

(19) 世界知的所有権機関
国際事務局



(43) 国際公開日
2004 年 7 月 29 日 (29.07.2004)

PCT

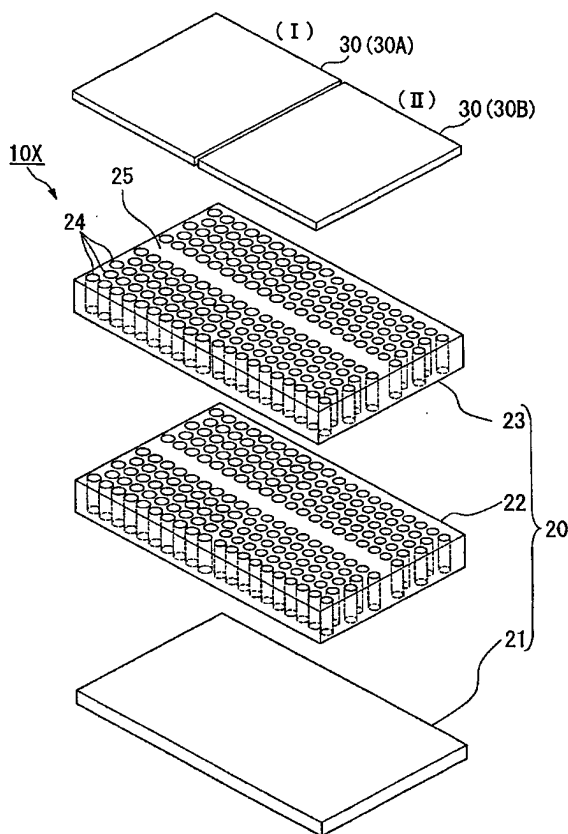
(10) 国際公開番号
WO 2004/063797 A1

- (51) 国際特許分類⁷: G02F 1/01
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2004/000170
- (22) 国際出願日: 2004 年 1 月 14 日 (14.01.2004)
- (25) 国際出願の言語: 日本語
- (26) 国際公開の言語: 日本語
- (30) 優先権データ:
特願 2003-7485 2003 年 1 月 15 日 (15.01.2003) JP
- (71) 出願人 (米国を除く全ての指定国について): 株式会社
デバイス・ナノテク・リサーチ・インスティテュート
(DEVICE NANOTECH RESEARCH INSTITUTE
INC.) [JP/JP]; 〒1000004 東京都千代田区大手町一丁
目 2 番 1 号 Tokyo (JP).
- (72) 発明者; および
- (75) 発明者/出願人 (米国についてのみ): 小川 憲介
(OGAWA, Kensuke) [JP/JP]; 〒1000004 東京都千代田
区大手町一丁目 2 番 1 号 株式会社バイオ・ナノ
テック・リサーチ・インスティテュート内 Tokyo
(JP). 藤井 充 (FUJII, Mitsuru) [JP/JP]; 〒1030007 東京
都中央区日本橋浜町 3 丁目 4 2 番 3 号 株式会社ア
イ・エヌ・アール・アイ内 Tokyo (JP).
- (74) 代理人: 大場 充 (OBA, Mitsuru); 〒1010032 東京都千
代田区岩本町 1 丁目 4 番 3 号 KMビル 8 階大場国
際特許事務所 Tokyo (JP).
- (81) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の国内保護が
可能): AE, AG, AL, AM, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BR,
BW, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM,
DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, HR, HU,
ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KP, KR, KZ, LC, LK, LR, LS,

[続葉有]

(54) Title: DISPERSION COMPENSATION ELEMENT, OPTICAL CRYSTAL, DISPERSION COMPENSATION SYSTEM, DISPERSION COMPENSATION METHOD

(54) 発明の名称: 分散補償素子、光学結晶、分散補償システム、分散補償方法



(57) Abstract: A dispersion compensation element (10X), wherein the sign and absolute value of wavelength dispersion compensation are made variable by setting a plurality of regions (I), (II) where holes (24) are mutually different in radius and interval, and by controlling voltages applied at electrodes (30A), (30B) in respective regions (I), (II). A dispersion compensation system which is constituted by using such a dispersion compensation element (10X) and which effects the dispersion compensation of an optical pulse propagated through an optical fiber transmission line by monitoring an optical pulse picked up from the optical fiber transmission line and controlling a voltage application amount at a dispersion compensation element (10X) based on its wavelength dispersion information. Or, dispersion compensation is possible also by changing the carrier density of a waveguide by applying a voltage to thereby change the refractive index of the waveguide.

(57) 要約: 分散補償素子 10X では、孔 24 の半径と間隔が互いに異なる複数の領域 (I)、(II) を設定し、領域 (I)、(II) のそれぞれにおいて、電極 30A、30B で印加する電圧を制御することで、波長分散補償の符号と絶対値を可変できるようにした。このような分散補償素子 10X を用いて構成する分散補償システムでは、光ファイバ伝送路から取り出した光パルスモニタリングし、その波長分散情報に基づき、分散補償素子 10X で印加する電圧印加量をコントロールすることで、光ファイバ伝送路を伝播される光パルスの分散補償を行うようにした。また、電圧を印加することによって導波路のキャリア密度を変動させ、導波路の屈折率を変化させることによっても、分散補償を行うこともできる。



LT, LU, LV, MA, MD, MG, MK, MN, MW, MX, MZ, NA,
NI, NO, NZ, OM, PG, PH, PL, PT, RO, RU, SC, SD, SE,
SG, SK, SL, SY, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US,
UZ, VC, VN, YU, ZA, ZM, ZW.

MC, NL, PT, RO, SE, SI, SK, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG,
CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

添付公開書類:

— 国際調査報告書

- (84) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の広域保護が可能): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LS, MW, MZ, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), ヨーロッパ (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HU, IE, IT, LU,

2 文字コード及び他の略語については、定期発行される各 *PCT* ガゼットの巻頭に掲載されている「コードと略語のガイダンスノート」を参照。

明 細 書

分散補償素子、光学結晶、分散補償システム、分散補償方法

5 技術分野

本発明は、光パルス伝送の際に生じる波長分散を補償する分散補償素子、分散補償システム等に関する。

背景技術

- 10 近年、データ通信は光ファイバを介したものに移行しつつあり、これに伴い、データの伝送速度も従来より飛躍的に高まっている。

近い将来、このような光ファイバを介したデータ通信において、超短光パルスを用い、現時点での伝送速度より遥かに高速な160 Gbit/sもしくはそれ以上の伝送速度で通信を行うことが検討されている。

- 15 ところで、データ通信を行う場合、常にクロストークや伝送エラーという問題がついて回るが、データの伝送速度が高まると、自ずと個々の光パルスの幅と、互いに前後する光パルスの間隔が狭まってくるため、この問題は非常に重要な問題となる。

- 光が物質中を進行する速度は、物質の屈折率で決まり、屈折率が大きいほど
20 光速度は遅くなる。ガラス、半導体、光学結晶等の物質では、屈折率は光の周波数(空気中の波長)によって変化するため、光速度は波長に依存することになる。この、屈折率の波長依存性により、光パルスが物質中を進行する間に光パルスの波形を歪ませ、パルスの時間幅が広がる要因となることが知られている。このように、光の波長に応じて光速度が異なる、という特性を、以下、波長分
25 散、あるいは単に分散と称する。

上記のようにして、光ファイバ中を進行する間に、光パルスの波形が歪んだり、光パルスの時間幅が広がるわけであるが、従来の伝送速度では光パルスの時間幅も大きいため、特に大きな問題とはならない。しかし、データの伝送速

度が高まると、前後の光パルスどうしが干渉するなどして、クロストークや伝送エラーが生じてしまう。このため、現状の技術のままで単に伝送速度を高めようとしたのでは、より高速度でのデータ通信は実現できないのである。

5 このような問題に対し、例えばフォトリック結晶を用い、波長分散を補償するという試みが既に行われている。

10 フォトリック結晶は、屈折率が異なる二つの物質を周期的に配列した構造を有しており、この配列の一部を欠陥させて欠陥導波路(連続欠陥部)を形成することで、特定の周波数の光のみが通過し、この光に対して特定の波長分散を与える導波モードが発生する。この導波モードを利用することで、光ファイバ伝送路の波長分散を補償するのである(例えば、細見和彦、勝山俊夫、「フォトリック結晶結合欠陥導波路の光伝搬特性(2)」、「第63回応用物理学会学術講演会講演予稿集第3分冊」、社団法人応用物理学会、平成14年(2002年)9月24日、p. 917参照。)

15 この他、フォトリック結晶と類似する構造として、光ファイバ回折格子を分散補償素子として利用する技術が実施されている。回折格子の周期を光ファイバの長手方向に沿って変化させたチャープ光ファイバ回折格子を用い、広いスペクトル帯域での波長分散を補償するという試みである(例えば、鈴木明、若林信一、「短パルスの分散補償技術」、「オプトロニクス」、株式会社オプトロニクス、平成14年(2002年)、21巻、4号、p. 161-165参照。)

20 また、理化学用の超短パルスレーザーが発生する光パルスを対象とした分散補償について、プリズム対や回折格子対を用いた技術が普及している。これらは、主として正の波長分散を補償するものである(例えば、J-C Diels, W Rudolph, "Ultrashort Laser Pulse Phenomena"、米国、Academic Press、1996年、p. 43-99参照。)

25 しかしながら、上記したような従来の波長分散補償技術を単純に用いたのでは、伝送速度のさらなる高速化には十分に対応しきれないという問題がある。

すなわち、波長分散は、前述したように光パルスの位相の波長(もしくは周波数、以下、単に波長と称する)依存性に起因するものである。一般に、光波の位

相は、ある波長を中心として、波長の次数(べき指数)の異なる項によって展開された多項式として表される。2次の項の係数が最低次の波長分散に対応し、それに続く次数項の係数として、3次、4次、5次と続くことが知られている(例えば、小川憲介、「超短光パルス測定」、「超高速光エレクトロニクス技術ハンドブック」、サイペック株式会社、平成15年(2003年)1月31日、第2章 2.4参照。)

現状の光パルスの伝送速度では、2次の項に対して波長分散を補償すれば十分であったが、伝送速度が高まるにつれて、データ送信に使用する光パルスの時間幅はより短くなり、それに反比例して光パルスのスペクトル幅は増加する。

したがって、伝送速度が上昇するほど、広いスペクトル帯域にわたり、より高次までの波長分散係数を補償しなければ、光パルスの波形の歪を除去することはできない。

ところが、フォトニック結晶あるいは光ファイバ回折格子を用いた従来の波長分散補償技術では、2次、3次、4次等、個々の次数に対し、波長分散を補償することができるものの、複数の次数に対し、波長分散を補償することはできなかった。これでは広いスペクトル帯域を利用する超高速大容量光通信に対応する波長分散補償は実現できない。

ところで、超高速大容量の光ファイバ伝送路は、それ自体で光パルスの伝送特性が最適となるように設計される。すなわち、伝送路全体として波長分散がゼロとなるように構成される。

しかし、例えば海底等に敷設される光ファイバ伝送路は、温度・気圧・振動等の影響により、光ファイバ伝送路が最適化された条件から外れることがある。そのような状況では、光ファイバ伝送路における波長分散は、正負の間を絶え間なく変化する。

これに対し、従来の技術では波長分散が正負に変化する場合において、波長分散補償の符号を波長分散の絶対値と独立に可変することは困難であった。このことは、波長分散値がゼロの付近で正負の間を絶え間なく変化するような状況に対応することが困難であることを意味する。

なお、「正」の波長分散とは、波長が長くなるほど光速度が増すことを指し、「負」の波長分散とは、波長が長くなるほど光速度が減少することを指している。

本発明は、このような技術的課題に基づいてなされたもので、光パルスの伝
5 送速度の高速化を実現することのできる分散補償素子、分散補償システム等を提供することを目的とする。

発明の開示

かかる目的のもと、本発明の分散補償素子は、外部から入射される光パルス
10 の波長分散を補償するものであり、入射端から出射端まで光パルスを導く導波路と、この導波路において光パルスに与える波長分散の絶対値と符号を可変とする分散変動手段と、を備えることを特徴とする。

このように、分散変動手段にて、光パルスに与える波長分散の絶対値と符号を可変とすることで、この分散補償素子に対し入射される光パルスの波長分散
15 に変動がある場合も、これに対応した分散補償を行うことができる。

分散変動手段としては、いかなる構成のものを採用してもよいが、例えば、以下に示すようなものが好適である。

まず、導波路は、例えばフォトニック結晶等の光学素子によって形成することができる。

20 フォトニック結晶は、誘電率の異なる二つの物質を交互に周期的に配列することで形成したものであり、導波路は、一方の物質中に存在する他方の物質を連続して欠落させることで形成できる。本発明では、一方の物質中に存在する他方の物質のサイズと間隔の組み合わせが異なる複数の領域を、この導波路が連続する方向に沿って配置するのが好ましい。また、製造が可能であれば、領域
25 ごとに、一方の物質と他方の物質の一方または双方を異ならせることも可能である。

複数の領域では、光パルスに対する波長分散の符号を互いに異ならせ、正負の領域を備えることができる。また、複数の領域では、光パルスに対する波長

- 分散の次数を互いに異ならせることもできる。このようにすれば、正負または複数次の波長分散に対し、分散補償することができる。また、光パルスに対する波長分散の次数毎に、波長分散の符号が互いに異なる領域を備えれば、それぞれの次数において正負の変動に対応可能となる。このような場合、分散補償素子が、 n 次までの波長分散を補償するのであれば、前記の領域は $2(n-1)$ 個設けられる。

このように設けられる複数の領域は、互いに前後する領域の境界部における光パルスの反射が最小となる配列で設けるのが好ましい。

- そして、これら複数の領域ごとに、導波路の屈折率を変化させるため、電気、熱、圧力等のエネルギーを外部から独立して付与するためのエネルギー付与部材を備えることで、光パルスに与える波長分散の絶対値と符号を自在に変動させる分散変動手段を構成することができる。

- エネルギー付与部材で電圧を印加することによって導波路のキャリア密度を変動させ、導波路の屈折率を変化させることもできる。この場合、導波路とはキャリア密度が異なる端子部を備えるのが好ましい。そして、電圧を印加するためのエネルギー付与部材は、この端子部に電氣的に接続される。

なお、上記のような複数の領域を備えるのであれば、フォトニック結晶の結晶素子は、一体の結晶であっても、複数の別体の結晶を組み合わせることで構成しても良い。

- 本発明は、入射端から出射端まで光パルスを導く導波路と、導波路とはキャリア密度が異なり、外部から電圧を印加して導波路の屈折率を変化させることによって、導波路で光パルスに与える波長分散を可変とする分散変動手段と、を備え、外部から入射される光パルスの波長分散を補償する分散補償素子として捉えることもできる。

- このような分散補償素子は、一方の物質中に存在する他方の物質のサイズと間隔の組み合わせが異なる複数の領域を、この導波路が連続する方向に沿って配置したフォトニック結晶を用いても良いが、一方の物質中に存在する他方の物質のサイズと間隔の組み合わせが単一な、一つの領域のみを有するフォトニ

ック結晶を用いても良い。

本発明は、フォトニック結晶のような光学結晶単体としても捉えることができる。すなわち、本発明の光学結晶は、誘電率の異なる二つの物質を、交互に周期的に配列することで形成された周期配列層を含み、この周期配列層は、一方の物質中に周期的に配列される他方の物質が連続して欠落した連続欠落部が形成されるとともに、連続欠落部が連続する方向において、一方の物質中における他方の物質の周期配列特性が異なる複数の領域が形成されていることを特徴とする。

ここで、周期配列特性には、一方の物質中に配列される他方の物質のサイズや間隔等がある。

このような周期配列層にて、複数の領域は、連続欠落部を光パルスが通過するとき、光パルスに与える波長分散の絶対値または符号が互いに異なるようにするのが好ましい。

また周期配列層に、この周期配列層を形成する一方の物質とは屈折率が異なる物質で形成された他の層を積層することで、光学結晶を形成することもできる。

ところで、連続欠落部は、周期配列層に、三次元状に形成してもよいが、設計や製造の容易性を高めるには、二次元状に形成するのが好ましい。同様の理由から、連続欠落部は、周期配列層の一端側から他端側に向けて直線状に形成するのが好ましい。

また、周期配列層に、連続欠落部とはキャリア密度が異なる異密度領域を形成しても良い。その場合、異密度領域は、連続欠落部よりもキャリア密度を高くするのが好ましい。

このような異密度領域には、周期配列層に電圧を印加するための電極が接続される。つまり、この異密度領域は端子部として機能するのである。その場合、電気抵抗を抑制するため、異密度領域は、前記の複数の領域よりも大きな面積とするのが好ましい。

本発明は、光パルス伝送路を介して伝播する光パルスの分散補償システムと

して捉えることもできる。この場合の分散補償システムは、光パルス伝送路上に設けられた光パルス取り出し部にて、光パルス伝送路を介して伝播される光パルスを取り出し、光パルス伝送路を介して伝播される光パルスに対し、分散補償部にて波長分散を与えることで波長分散を補償する。このとき、制御部に
5 て、光パルス取り出し部で取り出された光パルスに基づき、分散補償部で光パルスに与える波長分散の絶対値と符号をフィードバック制御するのである。

分散補償部は、光パルス伝送路から入射した光パルスに対して与える波長分散が互いに異なる複数の領域を備えた導波路と、導波路の領域ごとに、導波路の屈折率を変化させるエネルギーを外部から独立して付与するためのエネルギー付与部と、を備えた構成とすることができる。そして、制御部は、エネルギー付与部で付与するエネルギーの量を制御することで、分散補償部で光パルスに与える波長分散の絶対値と符号を制御するのである。
10

また、光パルス取り出し部で取り出された光パルスの特性と、エネルギー付与部で付与するエネルギーの量とを関連付けたデータを格納するデータ格納部
15 をさらに備えることも可能である。その場合、制御部は、光パルス取り出し部で取り出された光パルス、つまりこの光パルスをモニタリングすることで得られる補償前の光パルスの特性に基づきデータ格納部を参照し、エネルギー付与部で付与するエネルギーの量のデータを得る。そして、このエネルギーの量のデータに基づき、分散補償部で光パルスに与える波長分散の絶対値と符号を制
20 御するのである。

本発明は、光パルス伝送路上に設けられ、光パルス伝送路を介して伝播される光パルスを取り出す光パルス取り出し部と、光パルス伝送路上に設けられ、光パルス伝送路を介して伝播される光パルスに対し、波長分散を与える分散補償部と、光パルス取り出し部で取り出された光パルスに基づき、分散補償部の
25 キャリア密度を変動させることによって分散補償部の屈折率を変化させるため、分散補償部に印加する電圧を制御する電圧制御部と、を備え、光パルス伝送路を介して伝播する光パルスの分散補償システムとして捉えることもできる。

また、本発明は、光パルス伝送路を介して伝播される光パルスを取り出すス

- 5 テップと、取り出された光パルスに基づき、光パルス伝送路を介して伝播される光パルスに与える波長分散の絶対値と符号を決定するステップと、決定された波長分散の絶対値と符号に基づき、光パルス伝送路を介して伝播される光パルスに与える波長分散を変動させるステップと、を有することを特徴とする分散補償方法としても捉えることができる。

図面の簡単な説明

- 第1図は、本実施の形態における分散補償素子の構成を示す斜視図、第2図の(a)は、分散補償素子の断面図、(b)は、(a)の平面図、第3図は、10 コア層の斜視図、第4図は、周波数－波数特性曲線であり、(I)、(II)の領域における導波モードの違いを示す図、第5図は、規格化波数と規格化周波数の関係を示す図であり、(a)は導波モードの分枝が波数ゼロで最近接する場合を示す図、(b)はブリルアンゾーン境界で最近接する場合を示す図、第6図は、複数次の分散補償を行う場合の分散補償素子の構成を示す図であり、(a)15 はコア層の平面図、(b)は各領域における導波モードの違いを示す図、第7図は、複数次の分散補償を行う場合の補償原理を示す図、第8図は、分散補償システムの概略構成を示す図、第9図は、欠陥導波路のキャリア密度を変動させることで屈折率を可変とする分散補償素子の例を示す断面図、第10図は、第9図に示した断面構造を有する分散補償素子の例を示す平面図、第11図は、20 第9図に示した断面構造を有する分散補償素子の他の例を示す平面図、第12図は、第9図に示した断面構造を有する分散補償素子のさらに例を示す斜視図、第13図は、分散補償素子の他の一例を示す図である。

25 発明を実施するための最良の形態

以下、添付図面に示す実施の形態に基づいてこの発明を詳細に説明する。

第1図は、本実施の形態における分散補償システムを構成する分散補償素子の概略構成を説明するための図である。

この第1図、第2図に示すように、分散補償素子(分散補償部)10Xは、フォトニック結晶部20と、フォトニック結晶部20の一面側に設けられた電極(分散変動手段、エネルギー付与部材)30とを備えている。

5 フォトニック結晶部20は、基板21上に、クラッド層(他の層)22と、コア層(周期配列層)23とが積層されたもので、基板21は例えばシリコン(Si)で形成され、クラッド層22はシリコン酸化膜(SiO₂)または窒化シリコン膜、コア層23は誘電体であるシリコン結晶(Si)で形成されている。

ここで、基板21には、導電性を持たせるため、不純物が添加されている。

10 また、第3図に示すように、コア層23は、周期的に孔24が形成されている。これにより、コア層23は、コア層23の母材(例えばSi)と孔24の部分を満たす物質(一般には空気等の気体、他の物質を充填しても良い)により、誘電率(屈折率)の異なる2種類の物質が交互に周期的に配列されることで形成されている。

15 なお、第3図において、孔24はコア層23だけでなく、クラッド層22にまで形成されているが、これは製造上の理由によるものであり、少なくともコア層23にのみ形成されていれば良い。

コア層23に形成された孔24は、所定の半径(サイズ)rを有し、正三角形を単位胞とする三角格子状に配列され、各単位胞における孔24どうしは所定の間隔(正三角形の一辺の長さ)aを隔てている。

20 そして、このコア層23は、上記した孔24の半径rと、間隔aとが異なつて設定された、領域(I)、(II)を備えている。

このようなコア層23には、領域(I)、(II)を貫通する方向において直線状に連続するよう、孔24が欠損する(孔24を形成しない)ことで、いわゆる欠陥導波路(導波路、連続欠陥部)25が形成されている。

25 このような構成のフォトニック結晶部20では、コア層23の上下面にて、屈折率が異なる他の物質(下面側にクラッド層22、上面側は空気)が存在することで、欠陥導波路25の一端側の入射端から入射した光はコア層23の上下面で反射しながら伝播し、欠陥導波路25の他端側の出射端から出射する。光

が欠陥導波路 25 を伝播するとき、コア層 23 の領域 (I) を伝播する間に、この領域 (I) の孔 24 の半径 r と間隔 a に応じた波長分散を受け、続いて領域 (I I) を伝播する間に、この領域 (I I) の孔 24 の半径 r と間隔 a に応じた波長分散を受ける。つまり、このコア層 23 の欠陥導波路 25 から出射した光は、領域 (I) と (I I) を合成した波長分散を受けるのである。

さて、第 1 図および第 2 図に示したように、フォトニック結晶部 20 の一面側、具体的には基板 21 ではなくコア層 23 に対向する側には、電極 30 が設けられている。この電極 30 は、コア層 23 の屈折率を変化させるエネルギーを外部から付与するためのものである。本実施の形態では、電極 30 として、前記の領域 (I) と (I I) に対応して独立して電極 30 A、30 B が設けられている。

そして、電極 30 A、30 B には、外部に、電源 (図示無し) と、電源での電圧印加量をコントロールするコントローラ (図示無し) とが接続されるようになっており、これにより、分散変動手段が構成される。

電極 30 A、30 B と、導電性を有した基板 21 との間に電圧 (バイアス電圧) を印加すると、印加された電圧に応じてコア層 23 の領域 (I) と (I I) の屈折率が変化する。これを利用し、コントローラで、領域 (I) の電極 30 A と領域 (I I) の電極 30 B とに電源から印加する電圧を個別に制御することで、領域 (I)、(I I) で与える波長分散を独立して変動させ、これにより最適な分散補償を行うのである。

ここで、上記したような分散補償素子 10 X の、好ましい例を具体的に示す。

前述したように、フォトニック結晶部 20 の基板 21 は、導電性を有するために不純物を含有したシリコン (S i) で形成し、クラッド層 22 はシリコン酸化膜 (S i O₂) または窒化シリコン、コア層 23 は誘電体であるシリコン結晶 (S i) で形成した。そして、クラッド層 22 とコア層 23 の厚みは、各々 1000nm および 220nm とした。このクラッド層 22 とコア層 23 の厚みは、欠陥導波路 25 の横モードが単一となる条件 (横電界 (transverse electric, TE) 偏光に対して 23nm 以上かつ 240nm 以下) にある。

空気、コア層 2 3、クラッド層 2 2 の屈折率を、各々 n_{air} 、 n_{core} 、 n_{clad} と表すると、 $n_{\text{air}}=1.00$ 、 $n_{\text{core}}=3.50$ 、 $n_{\text{clad}}=1.45$ とした。

このようなフォトニック結晶部 2 0 は、コア層 2 3 を形成する材料の上にレジストを塗布し、フォトリソグラフィ等の手法により所定の孔 2 4 のパターン
5 レジスト上に形成する。そして、ドライエッチングによりコア層 2 3 を形成する材料上に欠陥導波路 2 5 を形成するための孔 2 4 のパターンを形成する。ここで、孔 2 4 の部分は、空気とした。

孔 2 4 の配列は、正三角形を単位胞とする三角格子とし、領域(I)および(I I)で周期を異ならせた。領域(I)では $a=493\text{nm}$ とし、領域(I I)では $a=$
10 473nm とした。各々の領域とも、 $r/a=0.4$ となるように半径 r を設定した。また、領域(I)および(I I)の境界で隣接する孔 2 4 間の間隔 d (第 1 図参照)は、三角格子の周期の大きいほうの値、すなわち 473nm より短くする。光が伝搬する欠陥導波路 2 5 は、線分 P_1-P_2 を中心としてそれに沿って構成された直線状とし、この欠陥導波路 2 5 は領域(I)の孔 2 4 が一つ分埋められた(欠陥し
15 た)ことにより形成される。領域(I I)の欠陥導波路 2 5 の幅は領域(I)と等しく取られている。領域(I)、(I I)それぞれにおける欠陥導波路 2 5 の長さは $100\mu\text{m}$ 、分散補償素子 1 0 X での欠陥導波路 2 5 のトータル長さは $200\mu\text{m}$ とした。

さて、第 4 図に示すものは分散補償素子 1 0 X における分散補償の原理を説明
20 明するための図である。

フォトニック結晶部 2 0 の領域(I)および(I I)は、各々第 4 図に示した光波伝搬を特徴付けるバンド特性を有する。欠陥導波路 2 5 中では、曲率の符号が異なる分枝 1 および 2 の導波モードがフォトニックギャップ中に形成される。

第 4 図のグラフの縦軸および横軸は、 $1/a$ で規格化した光の周波数および
25 波数である。導波モードは横電界(transverse electric, TE)偏光状態にある。欠陥導波路 2 5 中では、光は分枝 1 もしくは分枝 2 のモードとなって伝搬する。

入射する光パルスを中心周波数が特定の周波数であるときに、欠陥導波路 2 5 の領域(I)では上側の分枝 2 のモードが発生し、領域(I I)では下側の分枝

1のモードが発生するよう、領域(I)、(I I)の孔24の半径 r と間隔 a を互いに異ならせて設定するのである。

ところで第5図(a)に示すように、導波モードは分枝1および2が波数ゼロで最近接する場合と、第5図(b)に示すように、ブリルアンゾーン境界で最近接する場合とがあり、どちらの場合も適用可能であるが、本実施の形態では、
5 第5図(a)の特性を有するフォトニック結晶を対象とする。

光が物質中を伝搬する際の様子を調べる際に、周波数-波数の関係が重要となる。この関係より、光が物質中を伝搬する際の速度が求まる。この速度は光パルスの重心が移動するスピードを指し、群速度と呼ばれる。群速度は、周波数-波数特性曲線の傾き(微分係数)として与えられる。真空や空気中では、周波数-波数特性は直線となり、群速度は周波数によらず一定であるが、ガラス・半導体・金属などの物質中では周波数-波数特性は直線にならず、群速度は周波数に応じて変化する。したがって、空気中から入射した光が物質を透過する場合、空気中から入射する光の周波数(波長と言い換えてよい)に応じて群速度
10 は変化する。光パルスは単一の波長だけでなく、さまざまな波長成分を含んでいるので、群速度が波長に依存すると物質中を伝搬するにつれて光パルスの幅が広がり、波形が歪んでしまう。群速度が波長(または周波数)に依存するとき、その依存性を波長分散と呼ぶ。また、群速度が波長(または周波数)に応じて変化する割合を群速度分散と呼ぶ。群速度分散は、周波数-波数特性曲線の二階
15 微分に等しい。

第4図に示した周波数-波数関係を表す曲線において、分枝1および2では群速度分散の符号が互いに反転している。したがって、領域(I)および(I I)に加えるバイアス電圧を調整することによって曲線を変動させ、これによって、領域(I)および(I I)を含めた欠陥導波路25全体として、正、ゼロもしくは負の群速度分散が発生することが可能となっている。そして、ある光ファイバ伝送路を対象とすると、その光ファイバ伝送路のもつ群速度分散と符号が逆で、絶対値が等しい量の群速度分散が発生するようにバイアス電圧(I)および(I I)を変化させることによって、対象とする光ファイバ伝送路の波長分散を
25

除去するのである。

第6図は、第1図に示した分散補償素子10Xが正負の分散補償を実現するためのものであるのに対し、複数次の項に対する分散補償を実現するためのものである。

- 5 ここで、分散補償素子(分散補償部)10Yは、基本的に第1図に示した分散補償素子10Xと同様であるため、共通する構成については同符号を付してその説明を省略するが、フォトニック結晶部20は、基板21上に、クラッド層22と、コア層23とが積層されたものである。

- 10 このフォトニック結晶部20のコア層23に、周期的に形成された孔24の半径 r と間隔 a とが、領域ごとに異なるように設定されているのである。

複数次の分散補償に対応する分散補償素子10Yは、 n 次までの項の分散補償を実現するのであれば、 $2(n-1)$ 個の領域を有している。

- 15 第6図に示すように、例えば3次までの項の分散補償を行うのであれば、 $n=3$ であり、領域は $2(n-1)=2(3-1)=4$ 個が設定される。これら4個の領域(I)、(II)、(III)、(IV)において、2次の項の正負、3次の項の正負、計4通りの波長分散を与えるよう、それぞれ孔24の半径 r と間隔 a が設定されている。

第7図は、このような3次までの項の分散補償を行う場合を説明するためのものである。

- 20 この第7図に示すように、領域(IV)が2次の項の正、領域(I)が2次の項の負、領域(III)が3次の項の正、領域(II)が3次の項の負の波長分散を与える場合、

領域(IV)では、 $k = -c_2 v^2$ 、

領域(I)では、 $k = c'_2 v^2$ 、

- 25 領域(III)では、 $k = -c''_2 v^2 - c_3 v^3$ 、

領域(II)では、 $k = c'''_2 v^2 + c'_3 v^3$ 、

の式で表される曲線となる。ただし、各式は中心周波数付近の周波数一波数特性曲線を v のべき乗で近似して表している。

ここで、 k : 波数、 c : 正の数、 ν : 中心周波数を原点として表した周波数である。

そして、領域(I)～(IV)をトータルした、

$$k = (c'_2 - c_2 + c''_2 - c''_2) \nu^2 + (c'_3 - c_3) \nu^3$$

- 5 の式において、2次の項の係数： $(c'_2 - c_2 + c''_2 - c''_2)$ が分散補償素子10Yにおける2次の分散補償値を与え、3次の項の係数： $(c'_3 - c_3)$ が分散補償素子10Yにおける3次の分散補償値を与える。

- ところで、上記のような分散補償素子10Yでは、例えば4つの領域(I)～(IV)を備える構成となっているが、このように3以上の領域を備える場合、
10 第6図(b)に示すように、互いに隣接する領域間の境界部で、屈折率の違いから生じる反射による光減衰が最小となるような配列とするのが好ましい。具体的には、間隔 a の大小の順で領域(I)～(IV)を配列するのが望ましい。

さて、第8図は、上記したような分散補償素子10Xあるいは10Yを用いて構成する分散補償システム50の構成を示すものである。

- 15 分散補償システム50は、光ファイバ伝送路100上に備えられる。

光ファイバ伝送路100は、例えば海底等に長距離にわたって敷設されるもので、送信サーバ等の入射部101側から入射された光パルス列が、光ファイバ伝送路100を介して伝送され、受信サーバ等の出射部102側から出射されるようになっている。

- 20 分散補償システム50は、出射部102の近傍に備えられるもので、カプラ(パルス取り出し部)51と、モニター装置52と、制御装置(制御部、電圧制御部)53と、分散補償素子10Xあるいは10Y(以下、単に10Xと略称する)と、を備える。

カプラ51は、光ファイバ伝送路100から光パルスを取り出すものである。

- 25 モニター装置52は、カプラ51で取り出した光パルスを、波長分散の影響が無視できるなるべく短尺の光ファイバ54を介して受け取り、その光パルスの波形をモニターする。具体的には、光ファイバ伝送路100から取り出した光パルスの時間スペクトル面上での波形をモニター(測定)し、波形制御の対

- 象となる光パルスの持つ波長分散を次数毎の係数に分解して求め、これを波長分散情報として出力する。なお、このモニター装置 5 2 については、例えば、K Ogawa, “Real-time intuitive spectrogram measurement of ultrashort optical pulses using two-photon absorption in a semiconductor”、[online]、
- 5 平成 14 年（2002 年）年 3 月 11 日、Optics Express、Vol. 10, No. 5, p. 262-267、Optical Society of America、[平成 15 年（2003 年）1 月 14 日 検 索] 、 イ ン タ ー ネ ッ ト < URL: <http://www.opticsexpress.org/abstract.cfm?URI=OPEX-10-5-262> > に記載された構成を適用できるので、ここでは特に詳細な説明を行わない。
- 10 制御装置 5 3 は、モニター装置 5 2 から出力された波長分散情報を、短尺の光ファイバ 5 5 を介して受け取る。この制御装置 5 3 は、データベース（データ格納部）5 6 を備えており、このデータベース 5 6 には、波長分散の符号と絶対値に応じた、分散補償素子 10 X の電極 30 A、30 B での電圧印加量のデータが格納されている。
- 15 制御装置 5 3 では、モニター装置 5 2 から出力された波長分散情報を受け取ると、データベース 5 6 を参照することで、モニター装置 5 2 から受け取った波長分散情報（波長分散の係数）とは絶対値が等しく符号が反転した波長分散を分散補償素子 10 X が発生するための、電極 30 A、30 B での電圧印加量のデータを得る。そして、得られた電圧印加量のデータを、分散補償素子 10 X
- 20 に向けて出力する。
- ところで、分散補償素子 10 X は、その欠陥導波路 25 が、光ファイバ伝送路 100 上に介在し、光ファイバ伝送路 100 を伝播してきた光パルスが欠陥導波路 25 の一端側の入射端から入射し、他端側の出射端から光ファイバ伝送路 100 に出射するように設けられている。
- 25 そして、分散補償素子 10 X の電極 30 A、30 B に電圧を印加するための電源（図示無し）と、電源での電圧印加量をコントロールするコントローラ（図示無し）とが、分散補償素子 10 X に接続されている。

前記の、制御装置 5 3 から出力された電圧印加量のデータは、光ファイバ 5

7を介し、分散補償素子10Xのコントローラ(図示無し)に転送される。コントローラでは、受け取った電圧印加量のデータに基づき、電極30A、30Bに電源から所定の電圧を印加させることで、領域(I)、(II)それぞれの屈折率を変化させる。

- 5 このようにして、分散補償システム50では、光ファイバ伝送路100から取り出した光パルスモニター装置52でモニタリングし、その波長分散情報に基づき、分散補償素子10Xで印加する電圧印加量を制御装置53にてコントロールする構成とした。これにより、光ファイバ伝送路100において、温度、気象等による条件変動が生じて、常に最適な分散補償を行うことができる。
- 10 る。

そして、分散補償素子10Xでは、波長分散補償の符号を波長分散の絶対値と独立に可変とすることで、正負の分散補償が行える構成となっているので、光ファイバ伝送路100における波長分散が、正負の間を絶え間なく変化する場合であっても、分散補償を行うことができる。

- 15 なお、上記の議論は分散補償素子10Xだけでなく分散補償素子10Yを用いた場合にも同様に適用されるものであり、分散補償素子10Yを採用すれば、正負だけでなく、複数次の分散補償を行える。

- その結果、分散補償素子10X、10Y、およびそれを用いた分散補償システム50を用いることで、広いスペクトル帯域を利用する超高速大容量光通信
- 20 に対応する波長分散補償を実現することができ、伝送速度のさらなる高速化を十分に実現することが可能となる。

特に、分散補償素子10X、10Yは、領域毎に孔24の半径 r と間隔 a を異ならせるのみであるため、特に複雑な構造となることもなく、比較的低コストで上記効果を実現することが可能である。

- 25 また、制御装置53でも、予めデータベース56に格納された情報を参照することで、電極30A、30Bで印加する電圧量を制御する構成となっており、その場で複雑な処理等を行う必要がないため、制御装置53自体も低コストで製作することができる。

- さて、上記分散補償素子 10X あるいは 10Y は、電極 30 を用いてバイアス電圧をかけることでフォトニック結晶部 20 の屈折率を変化させる構成としたが、コア層 23 に不純物であるキャリア（電子あるいは正孔（ホール））を注入し、バイアス電圧をかけることによってフォトニック結晶部 20 の吸収スペクトル（屈折率の虚部）を変化させることもできる。

第 9 図は、そのような分散補償素子 10Z の例である。

- この第 9 図に示すように、分散補償素子 10Z は、全体として、基板 21 上に、クラッド層 22、コア層 23 が積層され、さらにコア層 23 上にはクラッド層 60 が積層された構成を有している。基板 21 は例えばシリコン (Si)、クラッド層 22、60 はシリコン酸化膜 (SiO_2) または窒化シリコン膜、コア層 23 は誘電体であるシリコン結晶 (Si) で形成されている。また、基板 21 は、例えば $500\text{ }\mu\text{m}$ 程度の厚さを有し、クラッド層 22 および 60 は、例えば $200\text{ nm} \sim 1\text{ }\mu\text{m}$ 、具体例としては 300 nm 、コア層 23 は 250 nm 程度の厚さを有している。

- 分散補償素子 10Z は、欠陥導波路 25 が連続する方向に対して直交した断面、つまり第 9 図に示した断面において、基板 21、クラッド層 22、コア層 23、クラッド層 60 が、孔 24 が形成された領域（以下、これをフォトニック結晶領域と称する）R1 よりも側方に延長するように形成されている。つまり、欠陥導波路 25 を中心として、その両側に孔 24 が形成されたフォトニック結晶領域 R1 が存在し、さらにその外側に、孔 24 が形成されていない拡張領域 R2 が形成されているのである。

上下をクラッド層 22 および 60 によって挟み込まれたコア層 23 には、拡張領域 R2 に、中央部の欠陥導波路 25 に対しキャリア密度が異なる領域（異密度領域）が、端子部 70 として形成されている。

- そして、このような分散補償素子 10Z では、この端子部 70 に、電圧を印加するための電極（分散変動手段、エネルギー付与部材）80 が電氣的に接続され、基板 21 の底面側には、基準電位を供給するための基準電極 81 が電氣的に接続されている。

端子部 70 は、コア層 23 に含まれる不純物（電子または正孔）をドーピングまたはアンドーピングすることによって、キャリア密度を欠陥導波路 25 に対して異ならせたものである。この端子部 70 に電極 80 を電氣的に接続し、バイアス電圧を印加すると、欠陥導波路 25 の部分と端子部 70 の部分のキャリア密度の差により電子または正孔が移動し、これによって欠陥導波路 25 の部分のキャリア密度が変化し、吸収スペクトルが変化する。例えば、不純物として p 型元素を用いる場合、+（プラス）のバイアス電圧を印加すると、正孔が両側の端子部 70 から中央部の欠陥導波路 25 に集まって欠陥導波路 25 のキャリア密度が上昇し、-（マイナス）のバイアス電圧を印加すると、正孔が欠陥導波路 25 から両側の端子部 70 に移動して欠陥導波路 25 のキャリア密度が低下する。

ここで、欠陥導波路 25 の部分に対し、端子部 70 のキャリア密度を低くしてもよいが、欠陥導波路 25 の部分に対し、端子部 70 のキャリア密度を高くする、つまり不純物をイオン注入等によってドーピングするのが好ましい。欠陥導波路 25 の部分に対し、端子部 70 のキャリア密度を高くすると、電極 80 が接続される端子部 70 では電気抵抗が小さくなり、しかも欠陥導波路 25 の部分の電気抵抗が大きくなって電界が集中しやすくなるからである。

このような不純物としては、半導体でも用いられている、p 型元素の B（ホウ素）、Al（アルミニウム）、Ga（ガリウム）、In（インジウム）、Tl（タリウム）、n 型元素の N（窒素）、P（リン）、As（砒素）、Sb（アンチモン）、Bi（ビスマス）等がある。これらのうち、p 型元素では、ドーピングを容易に行えることから、B（ホウ素）が特に好適である。

ドーピングする不純物として、p 型元素の B（ホウ素）を用いる場合、例えば、欠陥導波路 25 のキャリア密度（不純物元素の数）を 10^{17} 個/cm³ とすると、端子部 70 のキャリア密度を $5 \times 10^{18} \sim 5 \times 10^{19}$ 個/cm³、例えば 1×10^{19} 個/cm³ とするのが好ましい。

この場合、基板 21 は、キャリア密度を欠陥導波路 25 と同等とするのが好ましい。基板 21 と欠陥導波路 25 とで、キャリア密度が異なると、これらの

間に電荷分布が生じてしまい、設計等が複雑になるからである。

また、基板 2 1 に基準電極 8 1 が接続される面 2 1 a にも、電気抵抗を小さくするため、不純物をドーピングし、例えば端子部 7 0 と同等のキャリア密度とするのが好ましい。

- 5 第 1 0 図は、第 9 図に示したような断面構造を有する分散補償素子 1 0 Z の一例である。

この第 1 0 図に示すように、分散補償素子 1 0 Z₁ は、マウント 9 0 上に搭載されており、フォトリソニック結晶領域 R 1 の面積に対し、その両側の拡張領域 R 2 に形成された端子部 7 0 の面積が相対的に大きくなるように形成されて、平面視した状態で略 H 字状を有している。これは、端子部 7 0 の面積をなるべく大きくして、その電気抵抗を小さくするためである。

また、この分散補償素子 1 0 Z₁ は、第 1 図に示した分散補償素子 1 0 X と同様、孔 2 4 の半径 r と、間隔 a とが異なって設定された領域 (I)、(I I) を有している。そして、それぞれの領域 (I)、(I I) に独立してバイアス電圧を印加するため、分散補償素子 1 0 Z₁ は、領域 (I)、(I I) の両側にそれぞれ端子部 7 0 および電極 8 0 が設けられ、合計 4 つの電極 8 0 のそれぞれに、リード 8 5 を介し、マウント 9 0 上に設けられた外部電極 8 6 が電氣的に接続されている。

そして、フォトリソニック結晶領域 R 1 の欠陥導波路 2 5 の両端に対向するように先球型の光ファイバ F が配置され、これによって欠陥導波路 2 5 に光パルスが導かれ、分散補償を受けた後に導出されるようになっている。

また、第 1 1 図は、第 9 図に示したような断面構造を有する分散補償素子 1 0 Z の他の一例である。

この第 1 1 図に示すように、分散補償素子 1 0 Z₂ は、フォトリソニック結晶領域 R 1 に対し、その両側に広がる拡張領域 R 2 に設けられた端子部 7 0 および電極 8 0 が、台形状（あるいは扇形状）とされたものである。これにより、端子部 7 0 および電極 8 0 に比較して面積が小さいフォトリソニック結晶領域 R 1 までの距離をなるべく短くしつつ、端子部 7 0 および電極 8 0 の面積を大きく確保

することができる。これも、端子部 70 の電気抵抗を小さくするために有効である。

第 12 図は、第 9 図に示したような断面構造を有する分散補償素子 10Z のさらに他の一例である。

- 5 この第 12 図に示すように、分散補償素子 10Z₃ は、その表面のみが、第 10 図に示した分散補償素子 10Z₁ と同様に略 H 字状とされ、フォトニック結晶領域 R1 に対し、その両側に広がる端子部 70 および電極 80 の面積が大きくなるように形成されている。そして、基板 21 は、上部のみが平面視略 H 字状とされ、それより下方の部分は平面視略矩形状をなしている。
- 10 このような分散補償素子 10Z₃ は、基板 21 上に、クラッド層 22、コア層 23、クラッド層 60 を積層して平面視矩形状のブロックを形成した後、フォトニック結晶領域 R1 の欠陥導波路 25 の両端側をエッチング等により除去して段部 91 を形成することで得られる。このとき、フォトニック結晶領域 R1 の欠陥導波路 25 の両端には、突出部 92 を形成し、この突出部 92 に、光ファイバ F を対向させる。このため、段部 91 の深さは、光ファイバ F の外径に
- 15 応じて設定するのが好ましい。

- ところで、第 10 図～第 12 図で示した分散補償素子 10Z₁～10Z₃ は、孔 24 の半径 r と、間隔 a とが異なって設定された 2 つの領域 (I)、(II) を有する構成としたが、これを第 6 図に示した分散補償素子 10Y 等と同様、例
- 20 えば 4 つ等、3 以上の領域を備えるようにしても良い。その場合、領域の数に応じ、端子部 70 を設ける。

このような分散補償素子 10Z においても、第 8 図に示した分散補償システム 50 を構成することができる。

- この場合、制御装置 53 は、データベース 56 に、波長分散の符号と絶対値
- 25 に応じた、分散補償素子 10Z に対する電極 80 での電圧印加量のデータが格納されている。そして、制御装置 53 では、データベース 56 を参照することで、モニター装置 52 から受け取った波長分散情報に応じた、電極 80 での電圧印加量のデータを得て、これを分散補償素子 10Z に向けて出力する。

制御装置 53 から出力された電圧印加量のデータは、光ファイバ 57 を介し、分散補償素子 10Z のコントローラ (図示無し) に転送される。コントローラは、受け取った電圧印加量のデータに基づき電源から所定の電圧を発し、これを電極 80 を介して端子部 70 に印加させることで、欠陥導波路 25 の領域 (I)、

5 (II) それぞれの屈折率を変化させる。

このようにして、分散補償素子 10Z の場合も、分散補償システム 50 により、光ファイバ伝送路 100 において、温度、気象等による条件変動が生じて

10 も、常に最適な分散補償を行うことができる。その結果、広いスペクトル帯域を利用する超高速大容量光通信に対応する波長分散補償を実現することができ、伝送速度のさらなる高速化を十分に実現することが可能となるのである。

なお、上記実施の形態では、分散補償素子 10X、10Y、10Z において電極 30 を用いてバイアス電圧をかけることでフォトニック結晶部 20 の屈折率を変化させる構成としたが、これ以外の手段を分散補償手段として用いることも可能である。

15 例えば、各領域にヒータを設け、ヒータに電流を流してコア層 23 の温度を上昇させるのである。屈折率の温度依存性により、フォトニック結晶導波路の波長分散を変化させて波長分散補償に利用することができる。

さらに、圧電素子によりストレスをフォトニック結晶部 20 の両面から印加することでひずみを加え、屈折率を変化させることもできる。

20 また、フォトニック結晶部 20 は、第 13 図 (a) に示すように、基板 21 上にクラッド層 22、コア層 23 のみを備え、コア層 23 の一面側には空気が接する構成としたが、これに代えて、第 13 図 (b) に示すように、コア層 23 の上面側にさらにクラッド層 (他の層) 26 を設けるようにしても良い。この場合、クラッド層 26 には、クラッド層 22 と同様、 SiO_2 を用いることができる。

25 好ましい態様としてのクラッド層 22 の厚さは 500nm である。その他の部分の厚さ等は前記したのと同様である。

また、コア層 23 には、直線状の欠陥導波路 25 を形成する構成としたが、直線状に限るものではなく、折曲あるいは湾曲した形状とすることもできる。

さらに、上記実施の形態では、欠陥導波路 25 は二次元状に形成された構成となっているが、これを三次元状に形成する構成とすることも可能である。

この他、上記と同様の光に対する分散機能を有するのであれば、フォトニック結晶以外の光学素材、光学素子を用いることに何ら問題はない。

5 加えて、分散補償システム 50 では、モニター装置 52、制御装置 53 で光パルスをモニタリングして分散補償を制御する構成としたが、光ファイバ伝送路 100 における光パルス伝播条件がさほど変動しないような使用環境であれば、カプラ 51、モニター装置 52、制御装置 53 を省略し、常に一定の分散補償を行う構成とすることも可能である。

10 なお、入射部 101、出射部 102 で用いられるサーバや各種端末等は、光ファイバ伝送路 100 に対し信号の送出と受信の双方を行うのが通常である。上記分散補償システム 50 は、信号の受信の直前で分散補償を行うのが好ましいため、実際には、光ファイバ伝送路 100 の両端部に分散補償システム 50 を備えるのが好ましい。

15 加えて、分散補償システム 50 は、モニター装置 52、制御装置 53 と、分散補償素子 10X、10Y または 10Z とを一体の装置としても良いし、それぞれを別体のユニットとしても良い。

これ以外にも、本発明の主旨を逸脱しない限り、上記実施の形態で挙げた構成を取捨選択したり、他の構成に適宜変更することが可能である。

20

産業上の利用可能性

本発明によれば、複数の領域を設けることで、例えば、正負の分散補償や、複数次の分散補償を行うことができる。また、各領域における波長分散を変動させることで、波長分散補償の絶対値と符号を可変することが可能となる。

25 また、電圧を印加することによって導波路のキャリア密度を変動させ、導波路の屈折率を変化させることによって、分散補償を行うことができる。

そして、光ファイバ伝送路から取り出した光パルスをモニタリングし、その波長分散情報に基づき、波長分散を制御することで、光ファイバ伝送路におい

て、温度、気象等による条件変動が生じても、常に最適な分散補償を行うことができる。

その結果、広いスペクトル帯域を利用する超高速大容量光通信に対応する波長分散補償を実現することができ、伝送速度のさらなる高速化を十分に実現する
5 ることが可能となる。

請 求 の 範 囲

1. 外部から入射される光パルスの波長分散を補償する分散補償素子であって、
入射端から出射端まで前記光パルスを導く導波路と、
5 前記導波路において前記光パルスに与える波長分散の絶対値と符号を可変とする分散変動手段と、
を備えることを特徴とする分散補償素子。
2. 誘電率の異なる二つの物質を、前記導波路が連続する方向において交互に
10 周期的に配列することで形成され、一方の前記物質中に存在する他方の前記物質のサイズと間隔の組み合わせが異なる複数の領域が、前記導波路が連続する方向に沿って配置されていることを特徴とする請求項 1 に記載の分散補償素子。
3. 複数の前記領域は、前記光パルスに対する波長分散の符号が互いに異なる
15 ことを特徴とする請求項 2 に記載の分散補償素子。
4. 複数の前記領域は、前記光パルスに対する波長分散の次数が互いに異なることを特徴とする請求項 2 に記載の分散補償素子。
- 20 5. 前記分散補償素子は、 n 次までの波長分散を補償し、
前記領域が $2(n-1)$ 個設けられていることを特徴とする請求項 4 に記載の分散補償素子。
6. 複数の前記領域は、互いに前後する前記領域の境界部における、前記光パ
25 ルスの反射が最小となる配列で設けられていることを特徴とする請求項 2 に記載の分散補償素子。
7. 前記分散変動手段として、前記導波路の前記領域ごとに、当該導波路の屈

折率を変化させるエネルギーを外部から独立して付与するためのエネルギー付与部材を備えることを特徴とする請求項 2 に記載の分散補償素子。

8. 前記エネルギー付与部材は、電圧を印加することで前記導波路のキャリア
5 密度を変動させて、当該導波路の屈折率を変化させることを特徴とする請求項 7 に記載の分散補償素子。

9. 前記導波路とはキャリア密度が異なる端子部をさらに備え、
電圧を印加するための前記エネルギー付与部材は、前記端子部に電氣的に接
10 続されることを特徴とする請求項 8 に記載の分散補償素子。

10. 外部から入射される光パルスの波長分散を補償する分散補償素子であって、

- 入射端から出射端まで前記光パルスを導く導波路と、
15 前記導波路とはキャリア密度が異なり、外部から電圧を印加して前記導波路の屈折率を変化させることによって、当該導波路で前記光パルスに与える波長分散を可変とする分散変動手段と、
を備えることを特徴とする分散補償素子。

- 20 11. 誘電率の異なる二つの物質を交互に周期的に配列することで形成された周期配列層を含み、

前記周期配列層は、一方の前記物質中に周期的に配列される他方の前記物質が連続して欠落した連続欠落部が形成されるとともに、

- 前記連続欠落部が連続する方向において、一方の前記物質中における他方の
25 前記物質の周期配列特性が異なる複数の領域が形成されていることを特徴とする光学結晶。

12. 前記周期配列層にて、複数の前記領域は、前記連続欠落部を光パルスが

通過するとき、当該光パルスに与える波長分散の絶対値または符号が互いに異なることを特徴とする請求項 1 1 に記載の光学結晶。

5 1 3. 前記周期配列層に、当該周期配列層を形成する前記一方の物質とは屈折率が異なる物質で形成された他の層が積層されていることを特徴とする請求項 1 1 に記載の光学結晶。

1 4. 前記周期配列層にて、前記連続欠落部は二次元状に形成されていることを特徴とする請求項 1 1 に記載の光学結晶。

10

1 5. 前記連続欠落部が、前記周期配列層の一端側から他端側に向けて直線状に形成されていることを特徴とする請求項 1 1 に記載の光学結晶。

15 1 6. 前記周期配列層は、前記連続欠落部とはキャリア密度が異なる異密度領域が形成されていることを特徴とする請求項 1 1 に記載の光学結晶。

1 7. 前記異密度領域は、前記連続欠落部よりもキャリア密度が高いことを特徴とする請求項 1 6 に記載の光学結晶。

20 1 8. 前記異密度領域は、前記複数の領域よりも大きな面積を有していることを特徴とする請求項 1 6 に記載の光学結晶。

1 9. 光パルス伝送路を介して伝播する光パルスの分散補償システムであって、
前記光パルス伝送路上に設けられ、当該光パルス伝送路を介して伝播される
25 前記光パルスを取り出す光パルス取り出し部と、

前記光パルス伝送路上に設けられ、当該光パルス伝送路を介して伝播される光パルスに対し、波長分散を与える分散補償部と、

前記光パルス取り出し部で取り出された前記光パルスに基づき、前記分散補

償部で前記光パルスに与える波長分散の絶対値と符号を制御する制御部と、
を備えることを特徴とする分散補償システム。

20. 前記分散補償部は、前記光パルス伝送路から入射した前記光パルスに対して与える波長分散が互いに異なる複数の領域を備えた導波路と、

前記導波路の前記領域ごとに、当該導波路の屈折率を変化させるエネルギーを外部から独立して付与するためのエネルギー付与部と、を備え、

- 前記制御部は、前記エネルギー付与部で付与するエネルギーの量を制御することで、前記分散補償部で前記光パルスに与える波長分散の絶対値と符号を制御することを特徴とする請求項 19 に記載の分散補償システム。

21. 前記光パルス取り出し部で取り出された前記光パルスの特性と、前記エネルギー付与部で付与するエネルギーの量とを関連付けたデータを格納するデータ格納部をさらに備え、

- 前記制御部は、前記光パルス取り出し部で取り出された前記光パルスに基づき、前記データ格納部を参照して得た前記エネルギーの量のデータにより、前記分散補償部で前記光パルスに与える波長分散の絶対値と符号を制御することを特徴とする請求項 20 に記載の分散補償システム。

22. 光パルス伝送路を介して伝播する光パルスの分散補償システムであって、前記光パルス伝送路上に設けられ、当該光パルス伝送路を介して伝播される前記光パルスを取り出す光パルス取り出し部と、

前記光パルス伝送路上に設けられ、当該光パルス伝送路を介して伝播される光パルスに対し、波長分散を与える分散補償部と、

- 前記光パルス取り出し部で取り出された前記光パルスに基づき、前記分散補償部のキャリア密度を変動させることによって当該分散補償部の屈折率を変化させるため、当該分散補償部に印加する電圧を制御する電圧制御部と、
を備えることを特徴とする分散補償システム。

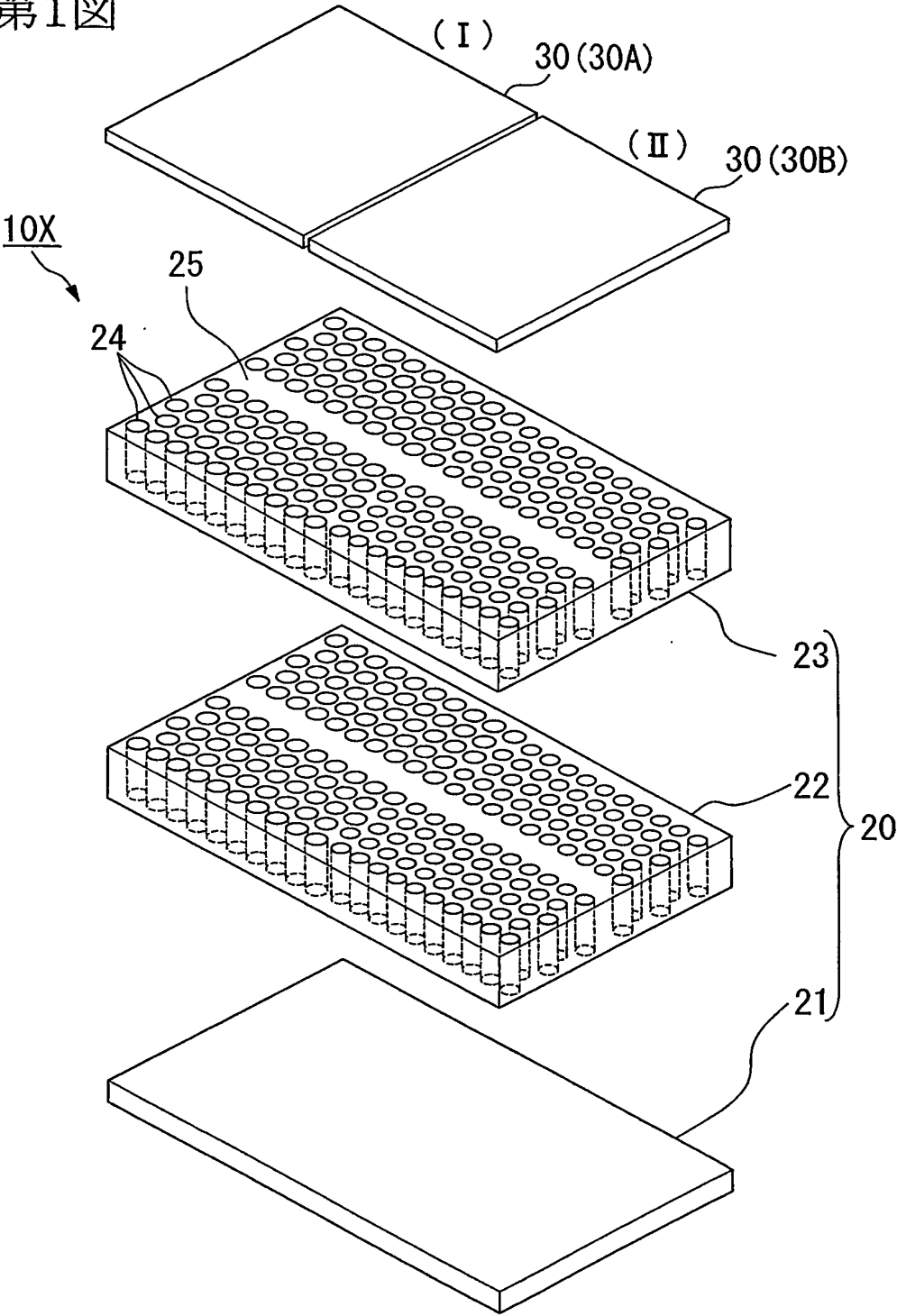
23. 光パルス伝送路を介して伝播される光パルスを取り出すステップと、

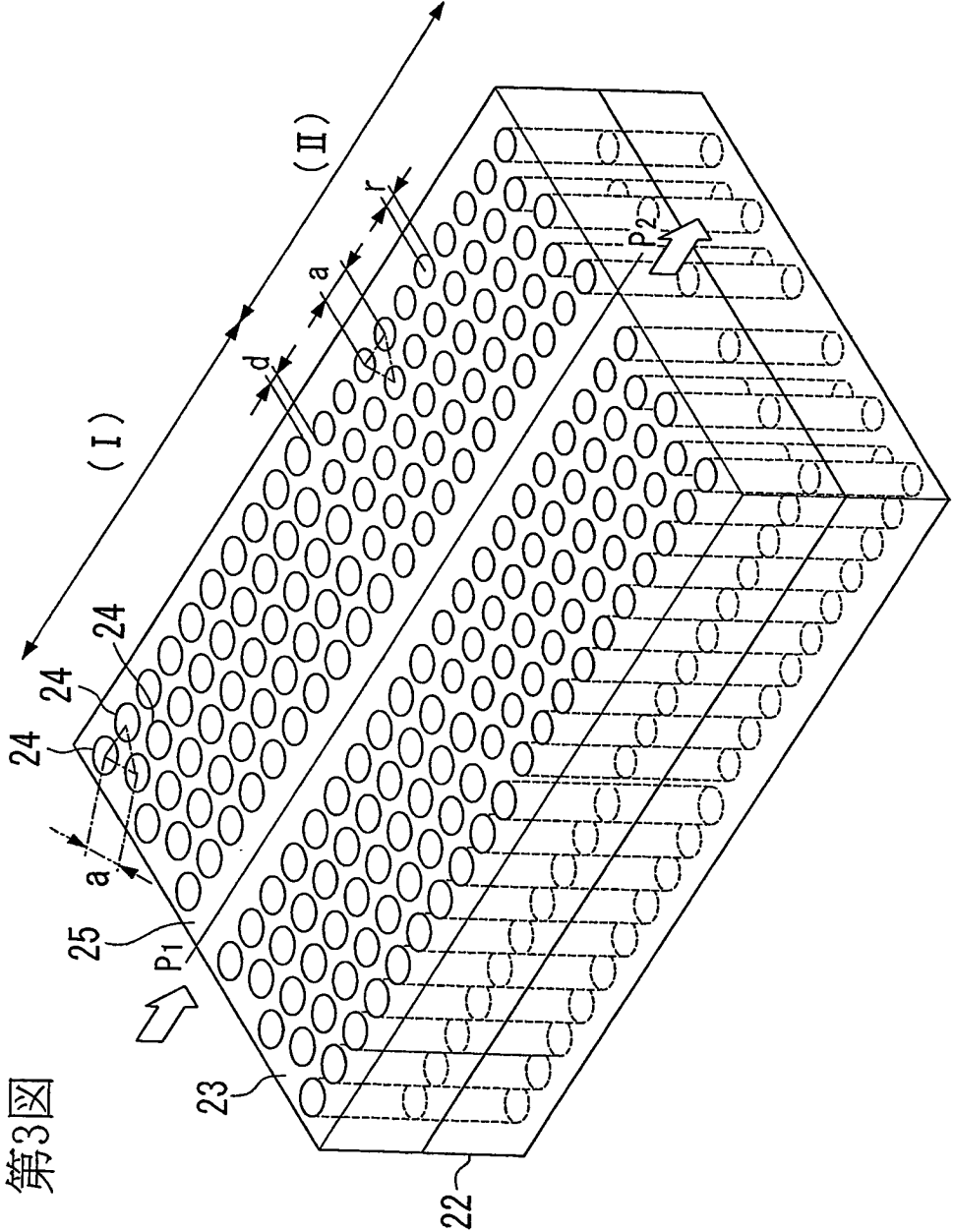
取り出された前記光パルスに基づき、前記光パルス伝送路を介して伝播される光パルスに与える波長分散の絶対値と符号を決定するステップと、

- 5 決定された前記波長分散の絶対値と符号に基づき、前記光パルス伝送路を介して伝播される光パルスに与える波長分散を変動させるステップと、
を有することを特徴とする分散補償方法。

1/13

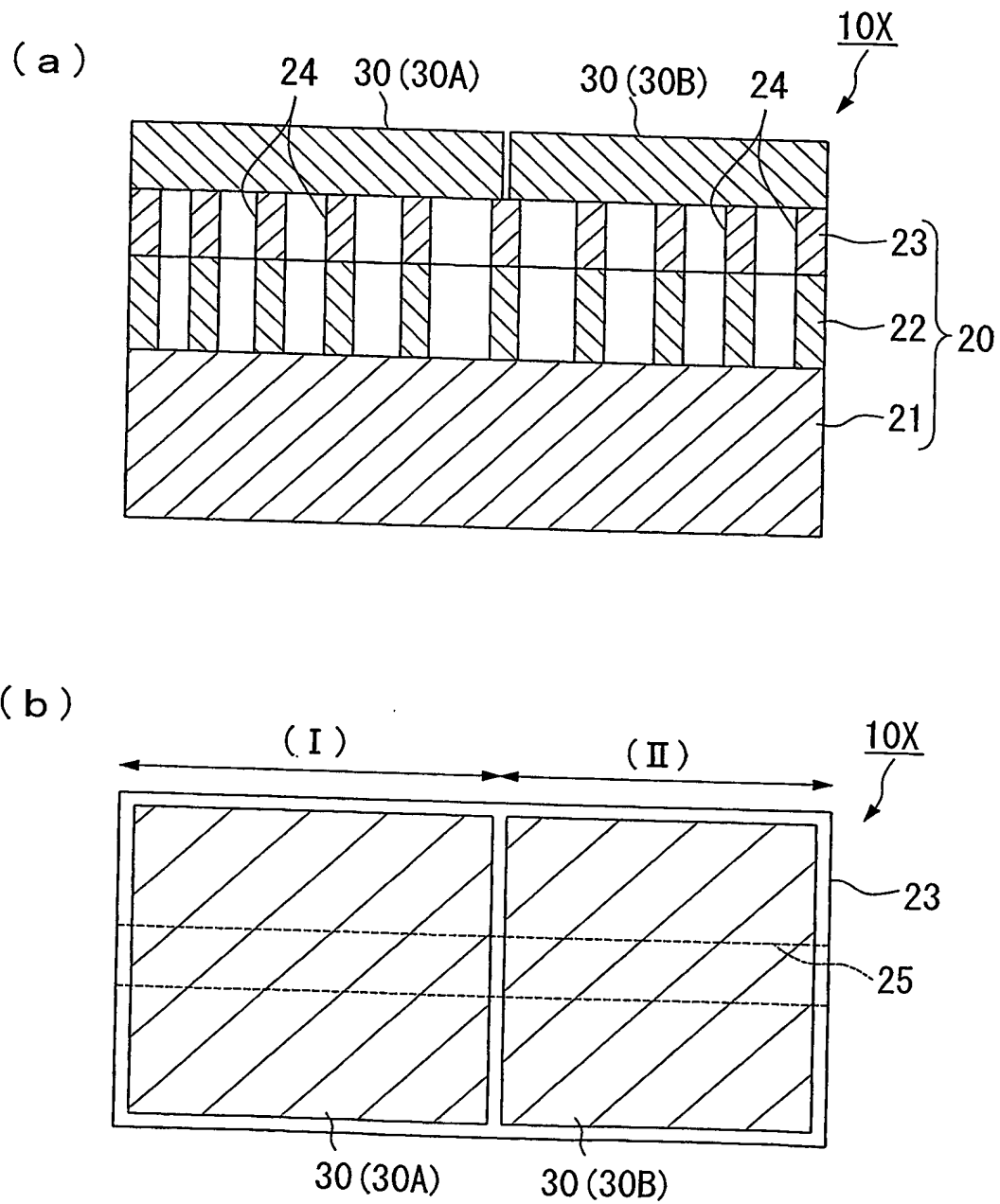
第1図



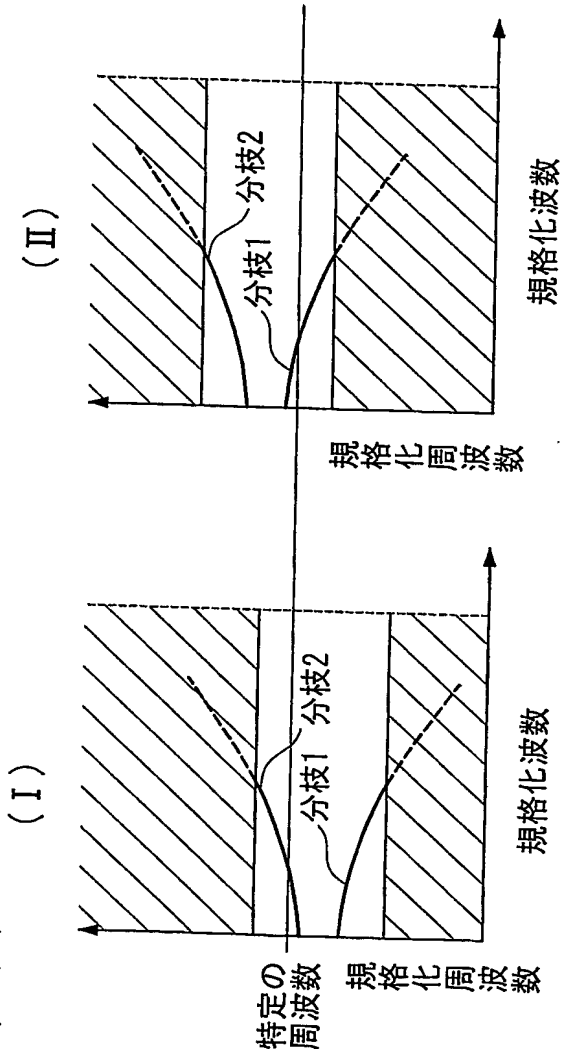


第3図

第2図



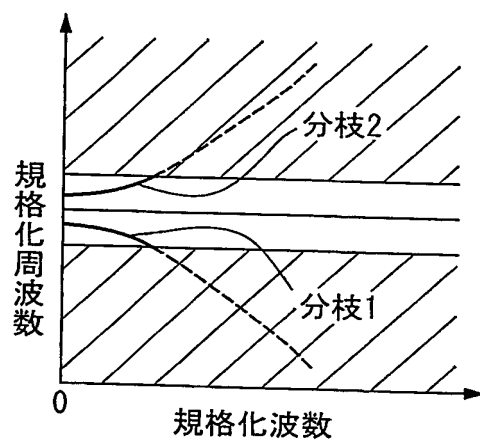
第4図



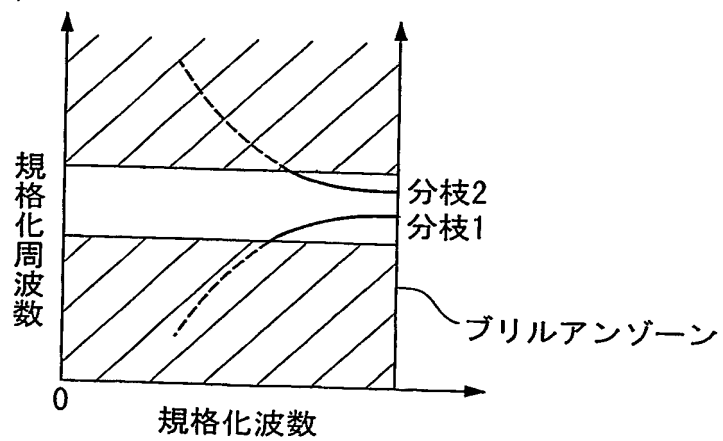
5/13

第5図

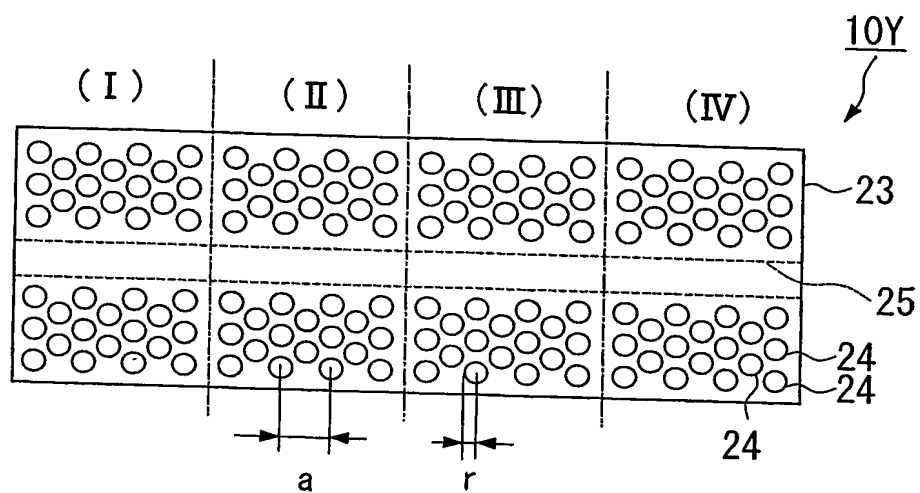
(a)



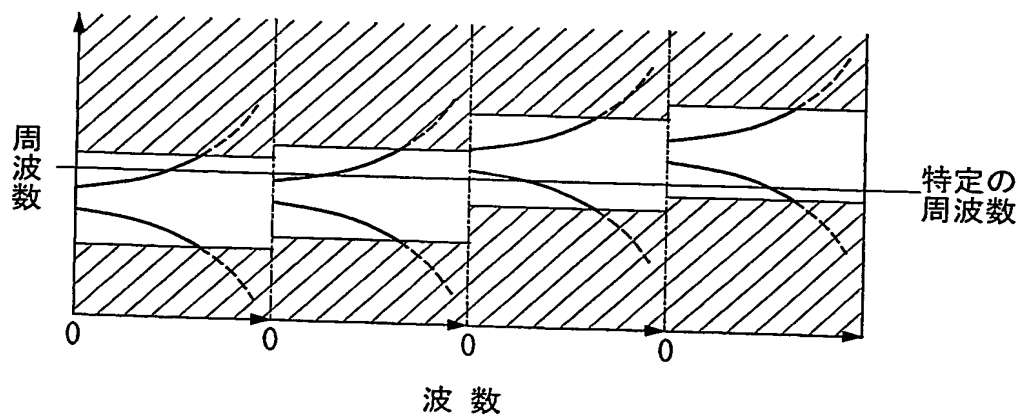
(b)



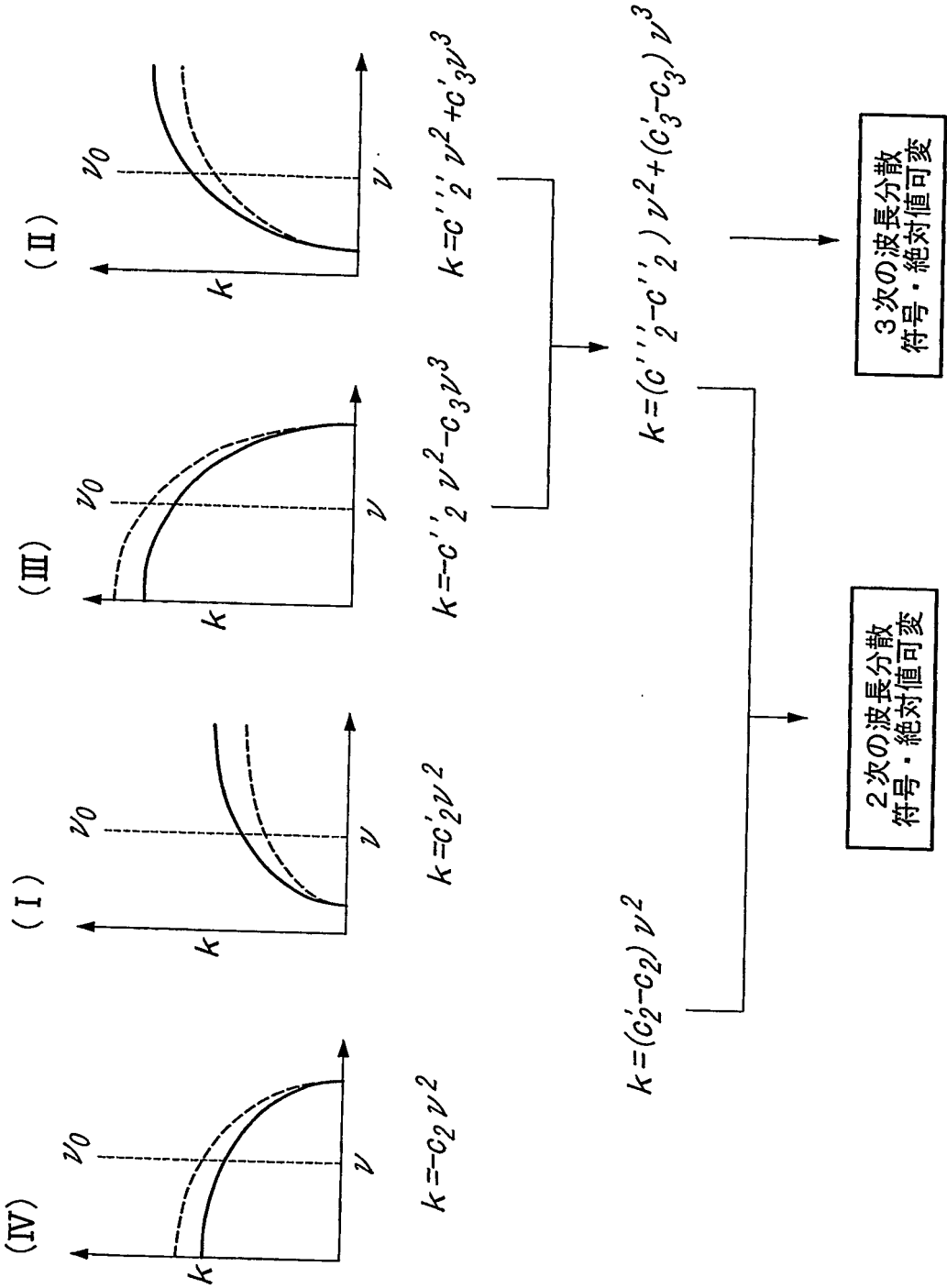
6/13

第6図
(a)

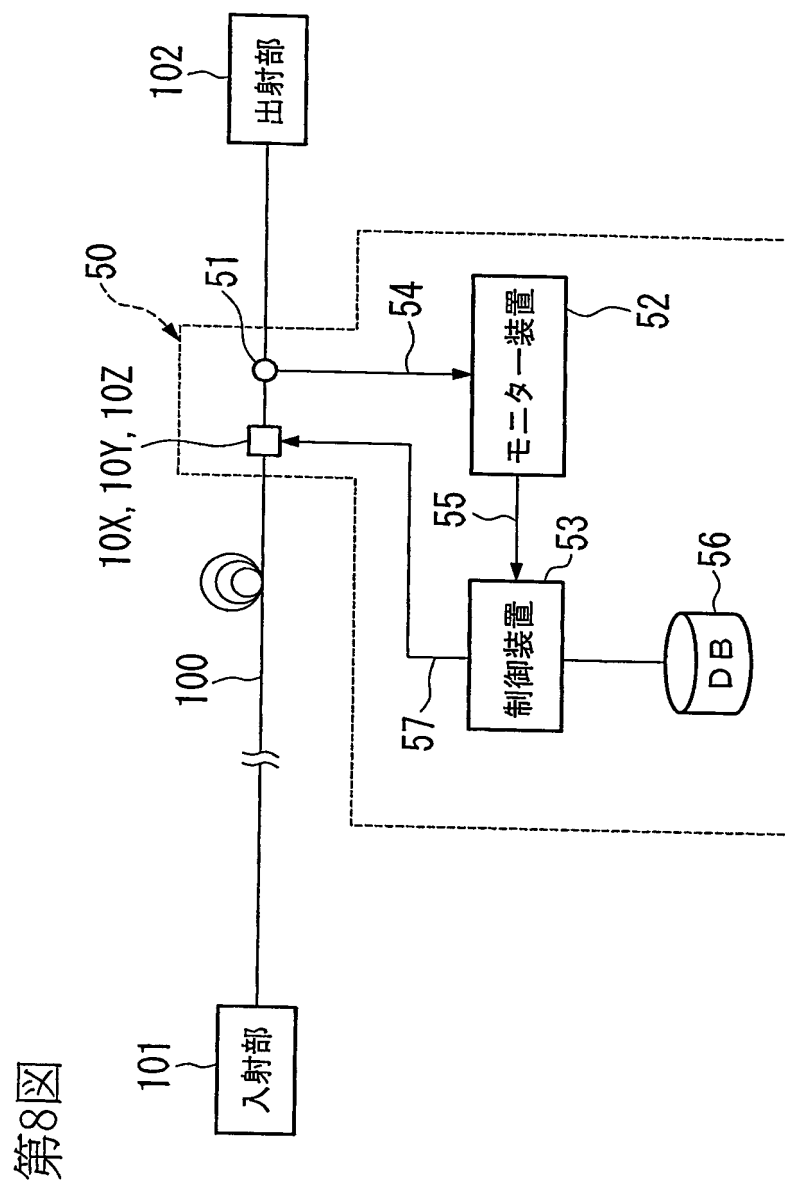
(b)



第7図

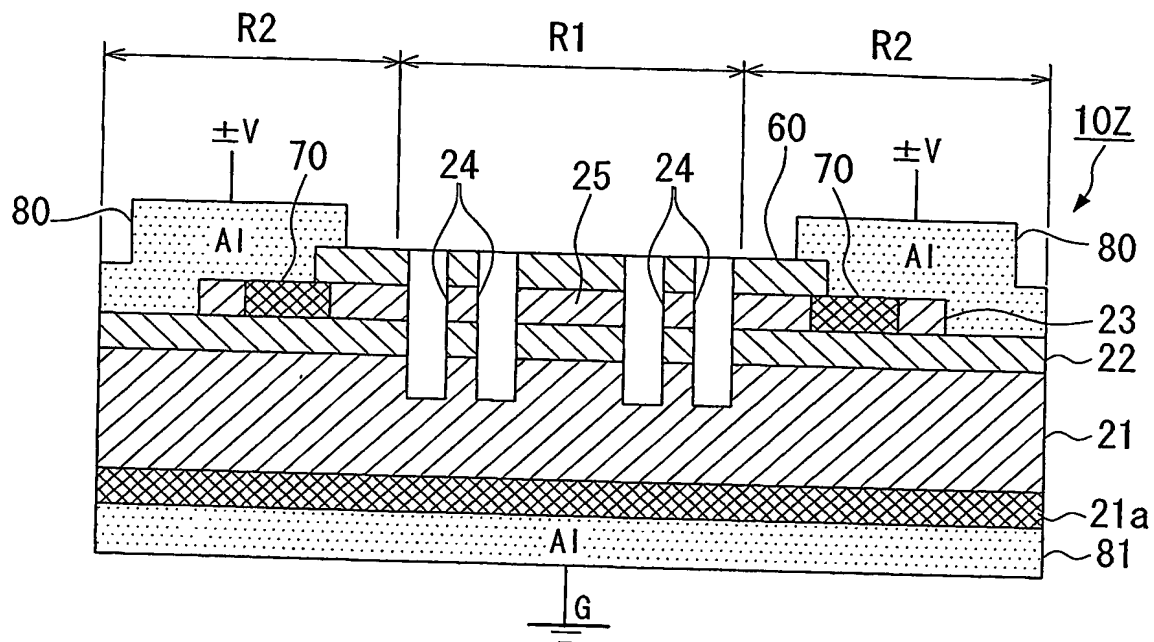


8/13



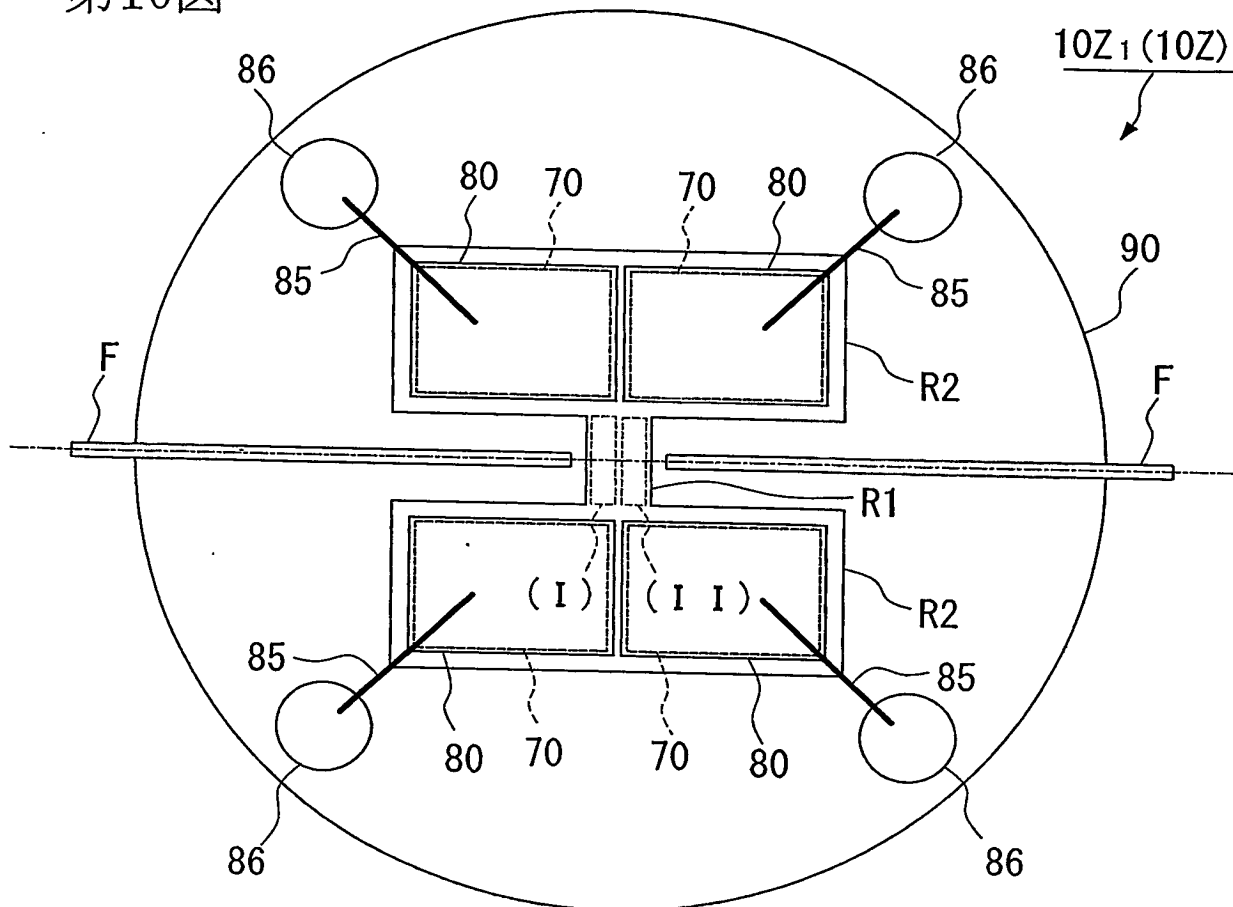
9/13

第9図



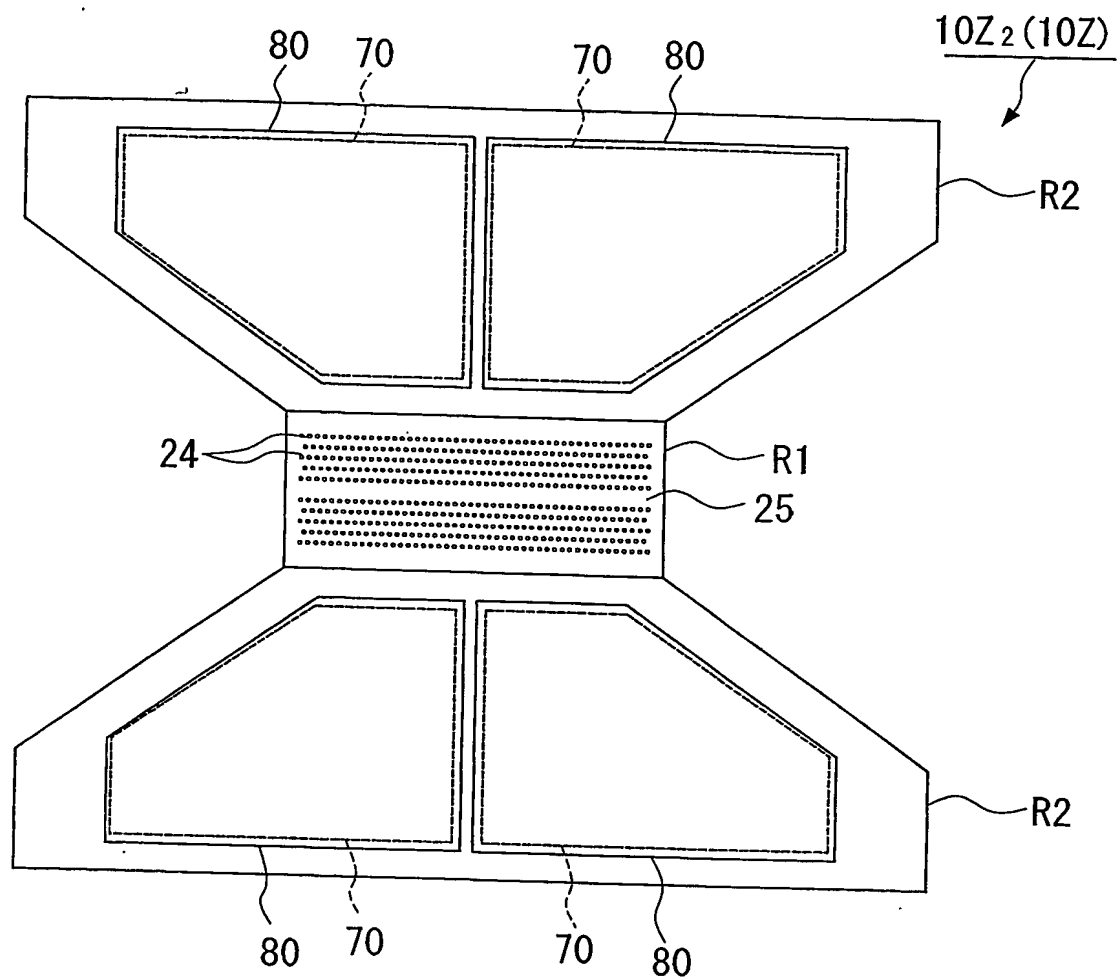
10/13

第10図



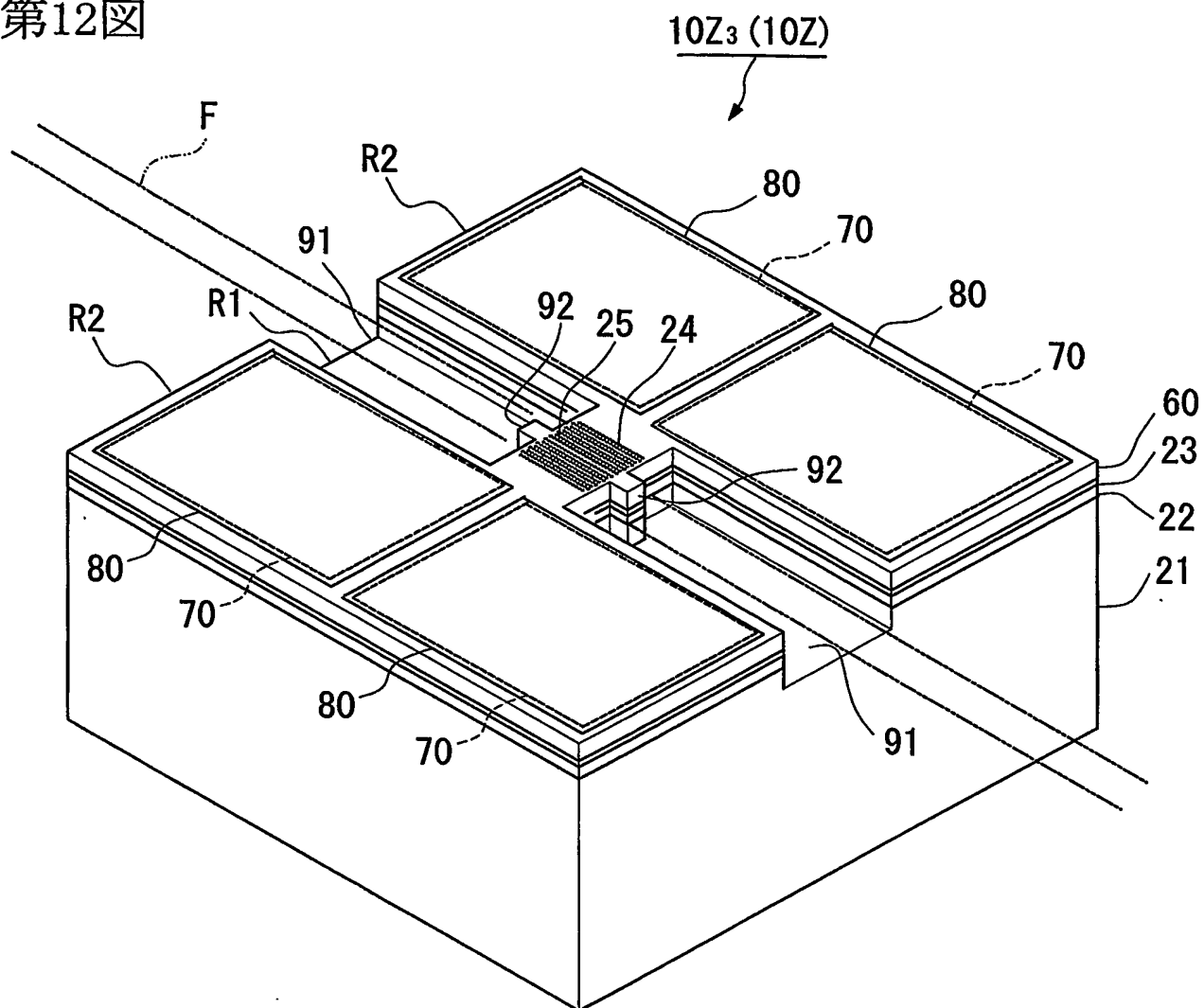
~11/13

第11図

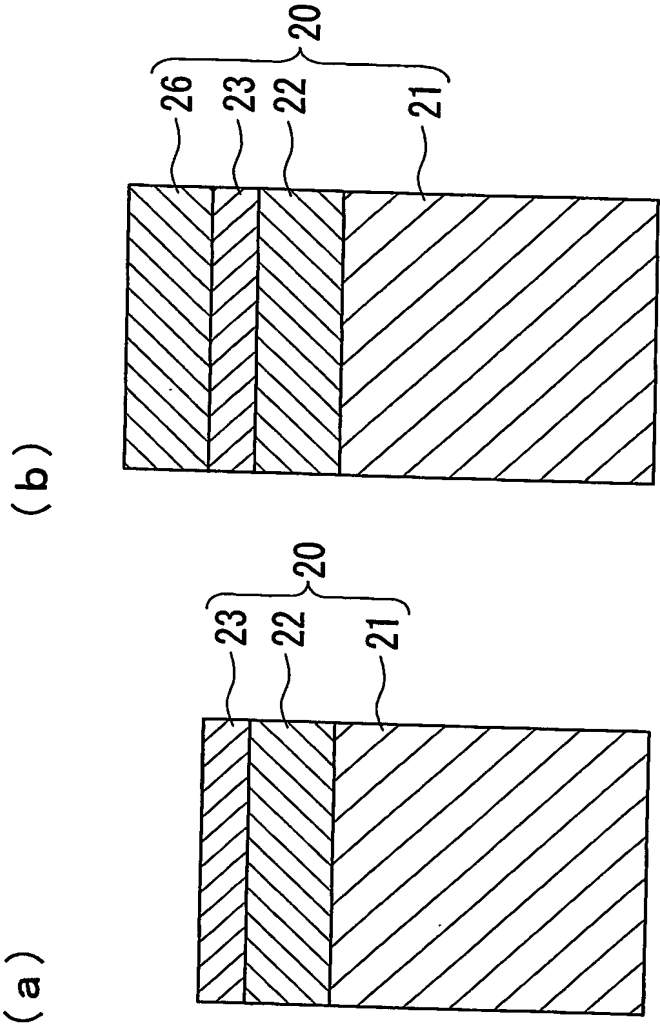


12/13

第12図



第13図



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2004/000170

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

Int.Cl⁷ G02F1/01

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

Int.Cl⁷ G02F1/01, G02B6/12, H04B10/00

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

| | | | |
|---------------------------|-----------|----------------------------|-----------|
| Jitsuyo Shinan Koho | 1922-1996 | Toroku Jitsuyo Shinan Koho | 1994-2004 |
| Kokai Jitsuyo Shinan Koho | 1971-2004 | Jitsuyo Shinan Toroku Koho | 1996-2004 |

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)
IEL Online, ISI Web of Science, JICST

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

| Category* | Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages | Relevant to claim No. |
|-----------|--|-----------------------|
| X | Suguru ASANO, Masamitsu MOCHIZUKI, Hosho SO, Susumu NODA, "2 Jigen Photonic Kessho ni yoru Hacho Bungoha Device -Men'nai e Tero Kozo no Teian-", Dai 49 Kai Oyo Butsurigaku Kankei Rengo Koenkai Koen Yokoshu, No.3, 29p-L-9, 2002.03, page 1039 | 11-13, 15 |
| P, X | Masahiro MORI, Toshihiko BABA, "Chirp Kozo o Motsu Photonic Kessho Doharo no Kento", Dai 50 Kai Oyo Butsurigaku Kankei Rengo Koenkai Koen Yokoshu, No.3, 28p-YN-1, 2003.03, page 1130 | 11-13, 15 |
| A | HOSOMI K., KATSUYAMA T., A Dispersion Compensator Using Coupled Defects in a Photonic Crystal, IEEE J.Q.Electron., Vol.38, No.7, July 2002, pages 825 to 829 | 1-23 |

☒ Further documents are listed in the continuation of Box C. ☐ See patent family annex.

| | |
|---|--|
| * Special categories of cited documents: | "T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention |
| "A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance | "X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone |
| "E" earlier document but published on or after the international filing date | "Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art |
| "L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified) | "&" document member of the same patent family |
| "O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means | |
| "P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed | |

Date of the actual completion of the international search
06 April, 2004 (06.04.04)

Date of mailing of the international search report
27 April, 2004 (27.04.04)

Name and mailing address of the ISA/
Japanese Patent Office

Authorized officer

Facsimile No.

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2004/000170

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

| Category* | Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages | Relevant to claim No. |
|-----------|--|-----------------------|
| X Y | JP 2002-333536 A (Hitachi, Ltd.), 22 November, 2002 (22.11.02), & US 2002/0172456 A1 | 1 2-9, 19-21, 23 |
| Y | JP 2002-243935 A (NEC Corp.), 28 August, 2002 (28.08.02), (Family: none) | 2-9, 19-21, 23 |
| Y | EP 997751 A (LUCENT TECHNOLOGIES INC.), 03 May, 2000 (03.05.00), & US 6289151 B & JP 2000-151513 A | 2-9, 20, 21 |
| Y | JP 2002-303836 A (NEC Corp.), 18 October, 2002 (18.10.02), & US 2002/0146196 A1 | 8-10, 16-18 |
| X Y | JP 06-311114 A (Mitsubishi Electric Corp.), 04 November, 1994 (04.11.94) (Family: none) | 10, 22 19-21, 23 |
| Y | JP 2000-121987 A (NEC Corp.), 28 April, 2000 (28.04.00) | 19-21, 23 |
| A | US 2002/0021878 A1 (CORNINC INC.), 21 February, 2002 (21.02.02), | 11-18 |
| P, X | JP 2003-279764 A (Japan Science and Technology Corp.), 03 October, 2003 (03.10.03), (Family: none) | 11-13, 15 |

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2004/000170

Box I Observations where certain claims were found unsearchable (Continuation of item 2 of first sheet)

This international search report has not been established in respect of certain claims under Article 17(2)(a) for the following reasons:

1. ☐ Claims Nos.:
because they relate to subject matter not required to be searched by this Authority, namely:
2. ☐ Claims Nos.:
because they relate to parts of the international application that do not comply with the prescribed requirements to such an extent that no meaningful international search can be carried out, specifically:
3. ☐ Claims Nos.:
because they are dependent claims and are not drafted in accordance with the second and third sentences of Rule 6.4(a).

Box II Observations where unity of invention is lacking (Continuation of item 3 of first sheet)

This International Searching Authority found multiple inventions in this international application, as follows:

"Special technical features" in claims 1-10, 19-23 relate to a dispersion compensation technology capable of controlling wavelength dispersion to be imparted to an optical pulse, while "special technical features" in claims 11-18 relate to an optical crystal containing a continuous defective portion-formed cyclic arrangement layer. These inventions are not so linked as to form a single general inventive concept, because there is no technical relationship among those inventions involving one or more of the same or corresponding technical features.

1. ☐ As all required additional search fees were timely paid by the applicant, this international search report covers all searchable claims.
2. ☒ As all searchable claims could be searched without effort justifying an additional fee, this Authority did not invite payment of any additional fee.
3. ☐ As only some of the required additional search fees were timely paid by the applicant, this international search report covers only those claims for which fees were paid, specifically claims Nos.:
4. ☐ No required additional search fees were timely paid by the applicant. Consequently, this international search report is restricted to the invention first mentioned in the claims; it is covered by claims Nos.:

Remark on Protest ☐ The additional search fees were accompanied by the applicant's protest.
☐ No protest accompanied the payment of additional search fees.

A. 発明の属する分野の分類 (国際特許分類 (IPC))

Int. Cl⁷ G02F1/01

B. 調査を行った分野

調査を行った最小限資料 (国際特許分類 (IPC))

Int. Cl⁷ G02F1/01 G02B6/12 H04B10/00

最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの

日本国実用新案公報 1922-1996年
 日本国公開実用新案公報 1971-2004年
 日本国登録実用新案公報 1994-2004年
 日本国実用新案登録公報 1996-2004年

国際調査で使用した電子データベース (データベースの名称、調査に使用した用語)

IEL Online
 ISI Web of Science
 JICST

C. 関連すると認められる文献

| 引用文献の カテゴリー* | 引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示 | 関連する 請求の範囲の番号 |
|-----------------|--|------------------|
| X | 浅野卓, 望月理光, 宗奉植, 野田進, 2次元フォトニック結晶による波長分合波デバイス—面内ヘテロ構造の提案—, 第49回応用物理学関係連合講演会講演予稿集, No. 3, 29p-L-9, 2002. 03, p. 1039 | 11-13, 15 |
| P X | 森大祐, 馬場俊彦, チャープ構造をもつフォトニック結晶導波路の検討, 第50回応用物理学関係連合講演会講演予稿集, No. 3, 28p-YN-1, 2003. 03, p. 1130 | 11-13, 15 |

☒ C欄の続きにも文献が列挙されている。☐ パテントファミリーに関する別紙を参照。

* 引用文献のカテゴリー

「A」特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの
 「E」国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの
 「L」優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献 (理由を付す)
 「O」口頭による開示、使用、展示等に言及する文献
 「P」国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願

の日の後に公表された文献

「T」国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの
 「X」特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの
 「Y」特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの
 「&」同一パテントファミリー文献

国際調査を完了した日

06. 04. 2004

国際調査報告の発送日

27. 4. 2004

国際調査機関の名称及びあて先

日本国特許庁 (ISA/J P)
 郵便番号 100-8915
 東京都千代田区霞が関三丁目4番3号

特許庁審査官 (権限のある職員)
 佐藤宙子

2X

9316

電話番号 03-3581-1101 内線 3293

| C (続き). 関連すると認められる文献 | | |
|----------------------|--|---------------------|
| 引用文献の カテゴリー* | 引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示 | 関連する 請求の範囲の番号 |
| A | HOSOMI K., KATSUYAMA T., A Dispersion Compensator Using Coupled Defects in a Photonic Crystal, IEEE J. Q. Electron., Vol. 38, No. 7, July 2002, p. 825-829 | 1-23 |
| X Y | JP 2002-333536 A(株式会社日立製作所) 2002. 11. 22 & US 2002/0172456 A1 | 1 2-9, 19-21, 23 |
| Y | JP 2002-243935 A(日本電気株式会社) 2002. 08. 28 (ファミリーなし) | 2-9, 19-21, 23 |
| Y | EP 997751 A(LUCENT TECHNOLOGIES INC.) 2000. 05. 03 & US 6289151 B & JP 2000-151513 A | 2-9, 20, 21 |
| Y | JP 2002-303836 A(日本電気株式会社) 2002. 10. 18 & US 2002/0146196 A1 | 8-10, 16-18 |
| X Y | JP 06-311114 A(三菱電機株式会社) 1994. 11. 04 (ファミリーなし) | 10, 22 19-21, 23 |
| Y | JP 2000-121987 A(日本電気株式会社) 2000. 04. 28 | 19-21, 23 |
| A | US 2002/0021878 A1(CORNING INCORPORATED) 2002. 02. 21 | 11-18 |
| PX | JP 2003-279764 A(科学技術振興事業団) 2003. 10. 03 (ファミリーなし) | 11-13, 15 |

第II欄 請求の範囲の一部の調査ができないときの意見 (第1ページの2の続き)

法第8条第3項(PCT17条(2)(a))の規定により、この国際調査報告は次の理由により請求の範囲の一部について作成しなかった。

1. ☐ 請求の範囲 _____ は、この国際調査機関が調査をすることを要しない対象に係るものである。つまり、
2. ☐ 請求の範囲 _____ は、有意義な国際調査をすることができる程度まで所定の要件を満たしていない国際出願の部分に係るものである。つまり、
3. ☐ 請求の範囲 _____ は、従属請求の範囲であってPCT規則6.4(a)の第2文及び第3文の規定に従って記載されていない。

第III欄 発明の単一性が欠如しているときの意見 (第1ページの3の続き)

次に述べるようにこの国際出願に二以上の発明があるところこの国際調査機関は認めた。

請求の範囲1-10, 19-23の「特別な技術的特徴」とは、光パルスに与える波長分散を制御可能な分散補償技術に関し、一方請求の範囲11-18の「特別な技術的特徴」は、連続欠落部が形成された周期的配列層を含む光学結晶に関するものである。これらの発明は、一又は二以上の同一又は対応する特別な技術的特徴を含む技術的な関係にないから、単一の一般的発明概念を形成するように連関しているものとは認められない。

1. ☐ 出願人が必要な追加調査手数料をすべて期間内に納付したので、この国際調査報告は、すべての調査可能な請求の範囲について作成した。
2. ☒ 追加調査手数料を要求するまでもなく、すべての調査可能な請求の範囲について調査することができたので、追加調査手数料の納付を求めなかった。
3. ☐ 出願人が必要な追加調査手数料を一部のみしか期間内に納付しなかったので、この国際調査報告は、手数料の納付のあった次の請求の範囲のみについて作成した。
4. ☐ 出願人が必要な追加調査手数料を期間内に納付しなかったので、この国際調査報告は、請求の範囲の最初に記載されている発明に係る次の請求の範囲について作成した。

追加調査手数料の異議の申立てに関する注意

- ☐ 追加調査手数料の納付と共に出願人から異議申立てがあった。
☐ 追加調査手数料の納付と共に出願人から異議申立てがなかった。